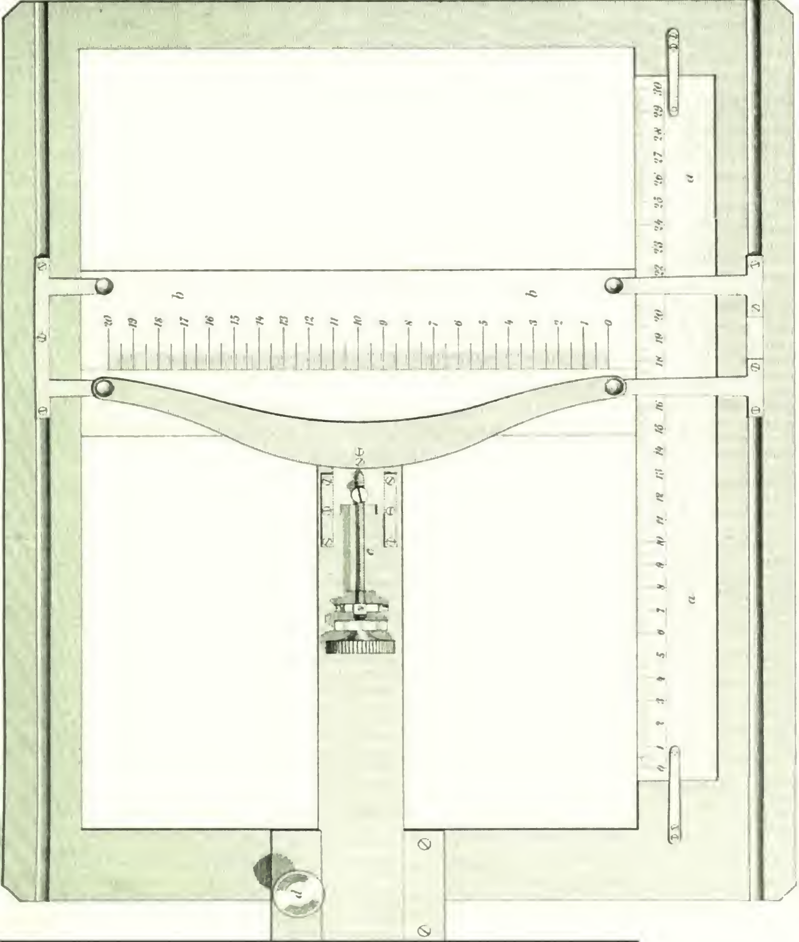


Abhandlungen der Sächsischen Akademie der Wissenschaften ...

Sächsische Akademie der Wissenschaften zu Leipzig. Mathematisch-Naturwissenschaftliche Klasse

Digitized by Google

Library of the University of Michigan
Bought with the income
of the
Ford - Messer
Bequest

Digitized by Google

AS
182
.S13

ABHANDLUNGEN

SIEBENUNDZWANZIGSTER BAND.

Digitized by Google

ABHANDLUNGEN

DER KÖNIGLICH SÄCHSISCHEN

GESELLSCHAFT DER WISSENSCHAFTEN.

SIEBENUNDZWANZIGSTER BAND.

MIT 19 TAFELN UND 103 FIGUREN.

LEIPZIG

BEI S. HIRZEL.

1891.

Digitized by Google

ABHANDLUNGEN

83704

DER MATHEMATISCH-PHYSISCHEN CLASSE

DER KÖNIGLICH SÄCHSISCHEN

GESELLSCHAFT DER WISSENSCHAFTEN.

SECHZEHNTER BAND.

MIT 19 TAFELN UND 103 FIGUREN.

LEIPZIG

BEI S. HIRZEL.

1891.

Digitized by Google

INHALT.

P. STARKE, Arbeitsleistung und Wärmeentwickelung bei der verzögerten Muskelzuckung. Mit 9 Tafeln und 3 Holzschnitten . . . . . . S. 1

W. PFEFFER, Über Aufnahme und Ausgabe ungelöster Körper. Mit Taf. I. - 145

W. PFEFFER, Zur Kenntniss der Plasmahaut und der Vacuolen nebst Bemerkungen über den Aggregatzustand des Protoplasmas und über osmotische Vorgänge. Mit Tafel II und 1 Holzschnitt . . - 185

J. WALTHER, Die Denudation in der Wüste und ihre geologische Bedeutung. Untersuchungen über die Bildung der Sedimente in den ägyptischen Wüsten. Mit 8 Tafeln und 99 Zinkätzungen . . . . - 345

Digitized by Google

ARBEITSLEISTUNG UND WÄRMEENTWICKELUNG

BEI DER

VERZÖGERTEN MUSKELZUCKUNG

VON

DR. PAUL STARKE.

Des XVI. Bandes der Abhandlungen der mathematisch-physischen Classe der Königl. Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften

N° I.

MIT NEUN TAFELN UND DREI HOLZSCHNITTEN.

LEIPZIG

BEI S. HIRZEL

1890.

Digitized by Google

Aus dem physiologischen Institut zu Leipzig.
Von dem Wirklichen Mitgliede C. Ludwig vorgelegt in der Sitzung vom 5. August 1889.
Das Manuscript zum Druck übergeben am 25. November 1889.
Der Druck vollendet am 25. Februar 1890.

Digitized by Google

ARBEITSLEISTUNG UND WÄRME-ENTWICKELUNG

BEI DER

VERZÖGERTEN MUSKELZUCKUNG

VON

DR. PAUL STARKE.

MIT NEUN TAFELN UND DREI HOLZSCHNITTEN.

Digitized by Google

Mit Unterstützung des „Elizabeth Thompson Science Fund“, Boston, Massachusetts.

Digitized by Google

Mit Eduard Weber, der in seiner grundlegenden und bahnbrechenden Arbeit[1]) sich der tetanischen Zusammenziehung bediente, glaubte man annehmen zu dürfen, dass die Höhe, um welche eine Masse von dem Muskel gehoben werden könne, nur von der Stärke des Reizes abhängig sei. Als aber Heidenhain[2]) nach dem Vorgange von Helmholtz[3]) die Folgen der Reizung auf die dabei sich entwickelnde Wärme ausdehnte und statt des Tetanus bei seinen Untersuchungen die Zuckung in Betracht zog, stellte sich heraus, dass die von dem Muskel producirte Wärmemenge ebenso wie die Zuckungsarbeit neben dem Reiz auch noch von der Spannung abhängig sei, mit welcher der Muskel seine Bewegung beginnt.

Zu diesen Aufschlüssen fügte Adolf Fick[4]) den weiteren, dass die Arbeit der Zuckung grösser ausfiel, wenn dem Muskel ausser dem Hube eines Gewichts die Bewegung einer trägen Masse zugemuthet wurde, als wenn man die Wirkung des Muskels unter Hinwegräumung der trägen Masse auf das Gewicht beschränkte. Damit hat also Fick die Existenz einer dritten, die Zuckungsarbeit und die Zuckungswärme beeinflussenden Veränderlichen nachgewiesen.

Der Einfluss der trägen Masse aber erstreckt sich nicht nur auf die Aenderung der Muskelarbeit (und der Muskelwärme), sondern dieselbe giebt auch Anlass zu einer Modification des zeitlichen Verlaufs der Zuckung. Die letztere wird um so mehr verlangsamt, je grösser jene

---

1) Wagner's Handwörterbuch, III, 1846.

2) Mechanische Leistung, Wärmeentwickelung und Stoffumsatz bei der Muskelthätigkeit. Leipzig, 1864.

3) Müller's Archiv, 1848, 1850, 1852.

4) Untersuchungen über Muskelarbeit. Basel 1867.

Digitized by Google

trägen Massen sind, welche mit einer von dem Muskel in Umdrehung zu versetzenden horizontalen Axe, an der das den Muskel belastende Gewicht hängt, in starrer Verbindung sich befinden.

Ich beabsichtige nun, den zeitlichen Verlauf, sowie die Arbeitsleistung und die Wärmeentwickelung bei der durch träge Masse gehemmten Zuckung des Muskels einer Untersuchung zu unterwerfen.

Formulirung der Aufgaben.

Vermöge der Thatsache, dass der Vermehrung der trägen Masse die Vergrösserung der Zuckungsdauer parallel geht, wäre, wie es scheint, der Weg vorgezeichnet, Muskelarbeit und Muskelwärme darzustellen als Functionen der Geschwindigkeit des Zuckungsverlaufs. Dies ist jedoch nicht angängig, weil die Muskelzuckung nie mit constanter Geschwindigkeit vor sich geht. Darum ist man gezwungen, zunächst einen anderen Weg einzuschlagen und die Trägheitsmomente derjenigen Massen zu bestimmen, welche zur Verlängerung der Zuckungsdauer Anlass geben.

Vorerst also sollen Zuckungsarbeit und Zuckungswärme bestimmt werden als Functionen der Trägheitsmomente der Drehaxe und der mit ihr in starrer Verbindung befindlichen, von Versuch zu Versuch zu variirenden trägen Massen.

Die Untersuchung kann aber noch andere Wege nehmen. Wenn nämlich auch die Geschwindigkeit, mit der der Muskel seine Bewegung vollführt, nie constant ist, vielmehr mit Null beginnt und zu einem Maximum anwächst, um alsdann wieder auf Null herabzugehen, so bieten doch hier dem Untersucher zwei neue, von dem obigen verschiedene Probleme sich dar. Einmal nämlich kann man sich die Aufgabe stellen, Arbeit und Wärme darzustellen als Functionen der Maximalgeschwindigkeit des Muskels, wobei, wenn auch mit der Vergrösserung des Trägheitsmoments der auf der Drehaxe befindlichen Massen die der Zuckungsdauer Hand in Hand geht, nicht nothwendig sich herauszustellen braucht, dass jene maximale Geschwindigkeit mit der Vermehrung des Trägheitsmoments sich beständig verringere.

Legen wir ferner den unendlich vielen verschiedenen Geschwindigkeiten, welche der Muskel während des Zuckungsanstiegs annimmt,

Digitized by Google

eine gewisse mittlere Geschwindigkeit dadurch zu Grunde, dass wir aus sämmtlichen Geschwindigkeiten das arithmetische Mittel ziehen, so können wir auch — und dies ist das andere der angekündigten Probleme — Zuckungsarbeit und Zuckungswärme betrachten als Functionen jenes arithmetischen Mittels der Geschwindigkeiten des Muskels.

Bei der Behandlung der beiden letzterwähnten Probleme aber können wir uns nicht auf die Messung der Höhen der Zuckungsgipfel über der Abscisse beschränken, sondern es erweist sich dazu das Studium der Zuckung in ihrem ganzen Verlaufe als nothwendig. Namentlich muss dann auf die Construction des Zuckungsapparates, insbesondere des Schreibhebels, die grösste Sorgfalt verwendet werden, da bei der Discussion der auf der Trommel verzeichneten Muskelcurve der Wendepunkt der letzteren eine Rolle spielt, und eine exacte und sichere Bestimmung desselben nur dann zu ermöglichen ist, wenn das drehbare System unter gänzlicher Fernhaltung von Eigenschwingungen der vom Muskel ausgelösten Bewegung zu folgen vermag.

Da wir das Trägheitsmoment der Drehaxe und der starr mit ihr verbundenen Massen als eine dritte zu Reizintensität und Anfangsspannung hinzukommende Veränderliche zu betrachten haben, welche die Quantität der Arbeit und der Wärme beeinflusst, können wir uns neben dem schon formulirten Problem, Arbeit und Wärme darzustellen als Functionen des Trägheitsmoments bei constanter Anfangsspannung, noch die umgekehrte Aufgabe stellen, nämlich das Trägheitsmoment constant lassen und die Anfangsspannung variiren. Beide Probleme in ein einziges zusammenfassend können wir also sagen: es handelt sich zuvörderst um die Darstellung sowohl der Zuckungsarbeit als der Zuckungswärme als Functionen der Anfangsspannung und des Trägheitsmoments. Die dritte hier noch in Frage kommende Veränderliche, die Reizintensität, habe ich nicht variirt, sondern den (uncurarisirten) Muskel stets mit ebenmaximalen Inductionsschlägen gereizt, und zwar, nach Adolf Fick's Vorgange, direct.

Digitized by Google

I. Technik und Methodik.

1. Das Uhrwerk.

Aus leicht ersichtlichen Gründen ist es wichtig, dass die Rotationsgeschwindigkeit der Trommel, auf welche die Zuckungscurven geschrieben werden, eine constante sei — nicht nur während desselben Versuchs, sondern auch während der ganzen Dauer der Versuche überhaupt; letzteres ist wenigstens sehr wünschenswerth. Diese Bedingung der Constanz der Trommelgeschwindigkeit aber wurde in vorzüglicher Weise erfüllt durch das von mir benutzte und von Tigerstedt[1]) bereits beschriebene Uhrwerk. Der einzige Unterschied war der, dass bei meinen Versuchen das Werk mit einem Treibgewicht von geringerer Masse versehen war, als bei Tigerstedt, wodurch natürlich auch die Geschwindigkeit der Uhr in entsprechendem Maasse sich verringert hat.

Macht das Uhrwerk ϱ Rotationen in ν Secunden, und beträgt der Trommelumfang l cm, so ist:

$$t = \frac{\nu}{\varrho l} \cdot T,$$

worin t die Zeit in sec und T die ihr proportionale auf der Trommel verzeichnete Abscisse bedeutet. Setzt man die Constante

$$\frac{\nu}{\varrho l} = \varkappa,$$

so ist in $t = \varkappa T$ die Constante $\varkappa$ zu bestimmen. Dies geschieht am bequemsten dadurch, dass man 20 Rotationen des Werkes abzählt. Da nämlich der Trommelumfang l 50 cm beträgt, so hat man die für jene 20 Rotationen erhaltene Secundenzahl nur durch 1000 zu dividiren, um zu der gesuchten Constanten zu gelangen.

Die Bestimmung derselben ergab für die beiden zum Uhrwerk gehörigen Trommeln, welche ich wie Tigerstedt mit A und B bezeichnen will, merklich gleiche Werthe.

Als Beleg hierfür will ich eine am 20/VI. 88 vorgenommene Geschwindigkeitsbestimmung anführen.

---

1) Du Bois-Reymond's Arch., 1885, Suppl., S. 134 u. f.

Digitized by Google

Trommel A.	Trommel B.
$\varkappa = 0.0224$ cm^{-1} sec	$\varkappa = 0.0226$ cm^{-1} sec
0.0226	0.0229
0.0229	0.0229
0.0229	0.0225
0.0229	0.0221
0.0224	0.0223
0.0229	0.0224

Als Mittelzahl der verschiedenen Bestimmungen erhalten wir also für Trommel A: $\varkappa = 0.0227$ cm^{-1} sec, und für Trommel B: $\varkappa = 0.0225$ cm^{-1} sec; unter Abrundung auf die dritte Decimale können wir also für $\varkappa$ einen beiden Trommeln gemeinschaftlichen Werth setzen, nämlich:

$$\varkappa = 0.023 \text{ cm}^{-1} \text{ sec.}$$

Bei Tigerstedt beträgt $\varkappa$ nur 0.016 cm^{-1} sec.

Die der Constante $\varkappa = 0.023$ cm^{-1} sec entsprechende Geschwindigkeit ist jedoch für manche Versuche, namentlich für solche mit grossen Trägheitsmomenten und geringer Anfangsspannung, unbequem gross; in einigen wenigen Experimenten habe ich daher durch Anwendung eines noch kleineren Treibgewichts die Umdrehungsgeschwindigkeit der Trommel etwas ermässigt. Ich bin jedoch bald wieder zu der grösseren Geschwindigkeit zurückgekehrt, weil ich bemerkte, dass die bei Benutzung des Treibgewichts von geringerer Masse sich ergebenden Werthe von $\varkappa$ mehr von einander abwichen, grössere Variationen zeigten, als die bei Anwendung des anderen.

Dies rührt offenbar daher, dass das Uhrwerk die Reibung zwischen seinen einzelnen Theilen, die innere Reibung, um so leichter zu überwinden vermag, je grösser das Gewicht ist, von dem es in Bewegung gesetzt wird.

In der That sind auch bei Tigerstedt, welcher, wie erwähnt, ein grösseres Treibgewicht benutzte als ich, die Variationen zwischen den einzelnen Werthen von $\varkappa$ noch geringer als bei mir.

Aber noch ein anderer Umstand ist es, welcher die Anwendung verschiedener Geschwindigkeiten, wenigstens innerhalb derselben Versuchsreihe, verbietet. Nämlich die Unterbrechung des den primären Strom öffnenden Contactes geschah wie bei den Tigerstedtschen, so auch bei meinen Versuchen durch das Uhrwerk selbst.

Digitized by Google

Diese Stromunterbrechung aber dürfen wir uns doch nicht so vorstellen, dass der Widerstand von einem bestimmten endlichen zu dem unendlich grossen Werthe innerhalb einer unendlich kurzen Zeit springt, sondern wir müssen annehmen, dass dazu eine wenn auch vielleicht unmessbar kurze, so doch jedenfalls endliche Zeit gehört; diese Zeit wird nun verlängert oder verkürzt, je nachdem die Rotationsgeschwindigkeit der Trommel verkleinert oder vergrössert wird.

Damit aber geht eine Verletzung der Grundbedingung Hand in Hand, nach welcher stets ein Inductionsschlag derselben Intensität den Muskel treffen soll.

2. Der Zuckungsapparat.

Nach mehreren missglückten Versuchen mit verschiedenen Systemen bin ich schliesslich bei folgender Einrichtung des Zuckungsapparats stehen geblieben.

A. Die Drehaxe.

Eine in Spitzen drehbare, cylindrische, stählerne und in einer Horizontalen gelegene Axe von etwa 0.8 cm Dicke trägt in ihrer Mitte eine Rolle aus Hartgummi, um welche der am unteren Muskelende befestigte Faden geschlungen war. Um zu verhindern, dass das belastende Gewicht der Bewegung des Muskels vorauseile, wurde der Faden, an dem dasselbe hing, direct um die Drehaxe gelegt. Bezeichnet man den um die halbe Fadendicke vermehrten Radius der Axe mit r und das Gewicht mit $P = MG$, M die Masse desselben, G die Gravitationsconstante, so ist ein constantes Drehungsmoment $Pr = MGr$ vorhanden. Wenn man ferner R den gleichfalls um die halbe Fadendicke vermehrten Radius der Rolle nennt, an welcher der Muskel angreift, so wird demselben die Anfangsspannung $P \cdot \frac{r}{R} = MG \cdot \frac{r}{R}$ ertheilt.

Zehn verschiedene Belastungen wurden angewandt. Ihre Massen betrugen:

$M =$ 98.930 g,	$M =$ 599.095 g,
197.385 -,	801.190 -,
301.025 -,	997.595 -,
398.500 -,	1199.680 -,
500.165 -,	1496.005 -.

Digitized by Google

Da nun $r = 0.43$ cm und $R = 3.88$ cm sich ergab, so hat man die obigen Massen durch $\frac{R}{r} = 9.02$ zu dividiren, um die Massen der zugehörigen Anfangsspannungen zu erhalten. Es ist also:

$M \cdot \frac{r}{R} =$	10.97 g,	$M \cdot \frac{r}{R} =$	66.42 g,
	21.88 -,		88.82 -,
	33.37 -,		110.60 -,
	44.18 -,		133.00 -,
	55.45 -,		165.85 -.

B. Der Schreibapparat.

An dem einen Ende der Drehaxe ist der Schreibapparat angebracht. Der »Schreibhebel«, welchen wir vom »Schreibstift« unterscheiden wollen, ist ein Prisma aus hartem Holze ungefähr von den Dimensionen 10, 1 und 0.15 cm, dessen Schwerpunkt in die Axe fällt und an dessen einem Ende der durch ein kleines prismatisches Eisenstück am anderen Ende des Hebels äquilibrirte Schreibstift sich befindet. Letzterer setzt sich aus zwei mit ihren unteren Enden aneinanderstossenden, je etwa 6 cm langen Stahldrähten zusammen. Die oberen Enden der Drähte sind um eine der Welle des Systems parallele Axe drehbar. An ihrem Vereinigungspunkte tragen die Stahldrähte den eigentlichen nur etwa 2 cm langen und am Ende rechtwinklig umgebogenen Schreibstift.

Nennt man Anfangsstellung des Systems diejenige, bei welcher die geometrische Axe des Schreibhebels in horizontaler Lage sich befindet, so ist hier die wichtige Frage zu beantworten, in welcher Beziehung der Drehwinkel φ, denselben von jener Anfangslage aus gerechnet, zu der von der Schreibstiftspitze auf der ruhenden Trommel verzeichneten Ordinate S steht? Nennt man $s = R\varphi$ den dem Drehwinkel φ der Rolle vom Radius R entsprechenden Bogen, so kann man auch nach der gegenseitigen Beziehung der Grössen s und S fragen. Diese Beziehung ist keine einfache, wie im Anhang I. gezeigt wird, wohl aber innerhalb gewisser Grenzen durch eine einfache ersetzbar, nämlich durch die Beziehung der Proportionalität $s = \lambda S$.

Dies zu beweisen, wurde auf die Drehaxe des Systems eine in 360° getheilte Messingscheibe von etwa 15 cm Durchmesser aufgeschraubt und dann, von der oben beschriebenen Anfangsstellung des

Digitized by Google

Systems ausgehend, für jeden Grad die zugehörige Abscisse auf der rotirenden Trommel verzeichnet.

So lange also, wenigstens in grosser Annäherung, die Beziehung $s = \lambda S$ bestehen soll, müssen die auf die Trommel geschriebenen Abscissen in annähernd gleichen Abständen aufeinander folgen.

Dass dies bei unserem Schreibapparat selbst für grosse Drehwinkel noch der Fall ist, lehrt die folgende Tabelle.

φ	S	Diff.	φ	S	Diff.
	mm			mm	
0°	0.00	0.95		31.15	0.95
	0.95	0.95	35°	32.10	0.80
	1.90	0.90		32.90	0.95
	2.80	0.90		33.85	0.85
	3.70	0.85		34.70	0.95
5°	4.55	0.95		35.65	0.80
	5.50	0.90	40°	36.45	0.90
	6.40	0.95		37.35	0.85
	7.35	0.95		38.20	0.90
	8.30	0.95		39.10	0.95
10°	9.25	0.90		40.05	0.85
	10.15	0.95	45°	40.90	0.95
	11.10	0.90		41.85	0.90
	12.00	0.90		42.75	0.95
	12.90	0.90		43.70	0.85
15°	13.80	0.90		44.55	0.85
	14.70	0.95	50°	45.40	1.00
	15.65	0.90		46.40	0.95
	16.55	0.90		47.35	0.95
	17.45	0.90		48.30	0.85
20°	18.35	1.00		49.15	0.85
	19.35	0.95	55°	50.00	0.85
	20.30	0.95		50.85	0.85
	21.25	0.85		51.70	0.95
	22.10	0.95		52.65	1.00
25°	23.05	0.95		53.65	0.90
	24.00	0.90	60°	54.55	1.00
	24.90	0.90		55.55	0.85
	25.80	0.85		56.40	0.95
	26.65	0.85		57.35	1.00
30°	27.50	0.90		58.35	0.90
	28.40	0.90	65°	59.25	1.00
	29.30	0.95		60.25	1.00
	30.25	0.90		61.25	1.00

Digitized by Google

φ	S	Diff.	φ	S	Diff.
	mm			mm	
	62.25	0.95	80°	74.80	1.10
	63.20	1.00		75.90	1.35
70°	64.20	0.95		77.25	1.25
	65.15	1.00		78.50	1.20
	66.15	1.00		79.70	1.35
	67.15	1.15	85°	81.05	1.40
	68.30	1.10		82.45	1.40
75°	69.40	1.05		83.85	1.45
	70.45	1.05		85.30	1.60
	71.50	1.15		86.90	1.50
	72.65	1.10	90°	88.40	
	73.75	1.05			

Da mithin die Abstände je zweier aufeinander folgender Abscissen um einen gewissen Mittelwerth schwanken, sofern man sich auf Drehwinkel bis zu 65° und Hubhöhen, die 60 mm nicht übersteigen, beschränkt, ist es statthaft, aus den aufgeschriebenen die wahren Hubhöhen dadurch abzuleiten, dass man erstere mit einem constanten Reductionsfactor λ multiplicirt. Um ihn zu finden, berücksichtigen wir, dass jener Mittelwerth der Differenzen, bei Beschränkung auf die oben angegebenen Werthe von φ und S, 0.91 mm beträgt. Der Umfang der Rolle aber, an welcher der Muskel angreift, beträgt 243.7 mm, also entspricht jedem Winkelgrad eine Bogenlänge von 0.68 mm. Daraus folgt $\lambda = \frac{0.68}{0.91}$, oder, mit einer für unsere Zwecke völlig ausreichenden Genauigkeit, $\lambda = \frac{3}{4}$. Die Vergrösserung der auf der Trommel verzeichneten Hubhöhen ist also eine nur $1\frac{1}{3}$-fache.

C. Die Schwungmassen.

Für die auf der Axe zu befestigenden Schwungmassen wählte ich die Stabform, weil dieselbe bei geringer Masse ein grosses Trägheitsmoment zu erzielen gestattet. Damit die zur Variation des Trägheitsmoments benutzten cylindrischen Stäbe ebenso wie der äquilibrirte Schreibhebel nichts zur Belastung des Muskels beitragen, müssen sie so auf der Axe angebracht werden, dass ihre Schwerpunkte in der geometrischen Axe der Drehwelle liegen. Dies zu ermöglichen trägt die letztere an dem dem Schreibhebel entgegengesetzten Ende einen kugelähnlichen Körper von circa 2 cm Durch-

Digitized by Google

messer, welcher einmal so durchbohrt ist, dass die Axe der cylindrischen Bohrung, deren Weite mit der Stabdicke übereinstimmt, die geometrische Axe der Drehwelle senkrecht schneidet. Ausserdem war durch den kugelförmigen Stahlkörper eine zweite zur ersten normale, schwach konische Bohrung geführt, die mitten durch die Kugel hindurchging, und in die ein stählerner Stöpsel genau eingeschliffen war. Derselbe diente dem Zwecke der leichten und sicheren starren Verbindung der in ihrer Mitte senkrecht zur geometrischen Axe gleichfalls durchbohrten Stäbe mit der drehbaren Welle des Systems.

Das Trägheitsmoment eines jeden solchen Stabes ist also zu bilden in Bezug auf eine durch seinen Schwerpunkt gehende und zur geometrischen senkrechte Axe. Diese Berechnung hat bekanntlich zu geschehen nach der Formel:

$$K = \frac{m}{12}(l^2 + 3r^2),$$

worin m die Masse, l die Länge, $2r$ die Dicke und K das gesuchte Trägheitsmoment des Stabes darstellen. Die zwölf Stäbe, deren Trägheitsmomente unter Zugrundelegung der obigen Formel berechnet wurden, unterscheiden sich also nur in der Masse und in der Länge; die Dicke $2r = 1.01$ cm ist ihnen gemeinschaftlich. Die Ausmessung der Stablängen und der Stabdicken, sowie die Bestimmung des Axen- und des Rollendurchmessers, geschah mit dem Kathetometer. Die zusammengehörigen Werthe von m, l und K sind in der folgenden Tabelle verzeichnet.

m	l	K
71.685 g,	11.76 cm,	830.75 gcm²,
110.038 -,	17.93 -,	2955.03 -,
148.028 -,	24.02 -,	7126.82 -,
173.370 -,	28.02 -,	11354.47 -,
197.368 -,	31.87 -,	16717.75 -,
223.075 -,	36.07 -,	24200.65 -,
247.953 -,	39.97 -,	33027.04 -,
297.000 -,	47.96 -,	56947.94 -,
371.923 -,	59.87 -,	111149.13 -,
492.005 -,	79.85 -,	261448.31 -,
617.667 -,	99.60 -,	510649.85 -,
749.025 -,	121.89 -,	927414.60 -.

Digitized by Google

So grosse Werthe aber auch die berechneten Trägheitsmomente annehmen, zu deren jedem noch das später nach anderer Methode zu bestimmende Anfangsmoment hinzukommt, reichen sie doch noch nicht aus. Der Muskel vermag selbst bei Anwendung viel grösserer träger Massen das System noch in Bewegung zu setzen.

Darum bin ich zu einer weiteren Vergrösserung des bisherigen grössten Moments geschritten. Es wurden dazu auf die Enden des längsten Stabes zwei gleich grosse und gleich schwere cylindrische Massen aufgesetzt, welche, weil sie sich in grosser Entfernung von der Drehaxe des Systems befinden, zu einer starken Vergrösserung des Trägheitsmoments beitragen.

Bezeichnet man zur Bestimmung des von den cylindrischen Massen herrührenden Zuwachses des Trägheitsmoments mit m die Masse, mit l die Länge, mit r_0 den inneren, der gemeinschaftlichen Stabdicke gleichen, und mit r_1 den äusseren Durchmesser eines jeden Cylinders, so ist bekanntlich sein Trägheitsmoment K in Bezug auf eine durch den Schwerpunkt gehende und zur geometrischen senkrechte Axe:

$$K = \frac{m}{12}\left(l^2 + 3\,(r_0^2 + r_1^2)\right).$$

Dies ist aber noch nicht der ganze Betrag des von jedem Cylinder herrührenden Moments. Um ihn zu erhalten, müssen wir von einem häufig benutzten Satz Gebrauch machen. Die geometrische Axe der Drehwelle unseres Systems, in Bezug auf welche Axe sämmtliche Trägheitsmomente zu bilden sind, geht nicht durch den Schwerpunkt des Cylinders. Bezeichnet man die Entfernung des Schwerpunkts von dieser Axe mit e, so ist bekanntlich das gesuchte Trägheitsmoment K' des Cylinders in Bezug auf die Drehaxe des Systems:

$$K' = K + me^2.$$

Nun wurde jeder Cylinder so auf den längsten Stab aufgeschoben, dass der Querschnitt des letzteren mit der Stirnfläche des Cylinders in einer Ebene lag, also ist in unserem Falle: $e = \frac{L - l}{2}$, wenn L die Stablänge bedeutet. Daraus folgt:

$$K' = \frac{m}{12}\left(l^2 + 3\left[r_0^2 + r_1^2 + (L - l)^2\right]\right).$$

Innerer und äusserer Durchmesser waren für beide Cylinder einander gleich, nämlich $2r_0 = 1.02$ cm, $2r_1 = 4.78$ cm; die Längen aber differirten um 0.01 cm; es war nämlich für den einen

Digitized by Google

$l = 4.47$ cm und für den anderen $l = 4.48$ cm. Daraus erklärt es sich, dass auch die Massen nicht ganz genau stimmten; für den kürzeren Cylinder war $m = 620.925$ g und für den längeren $m = 621.100$ g.

Mithin ergibt sich für den ersten Cylinder:

$$K' = 2\,142\,215.31 \text{ gcm}^2,$$

und für den zweiten:

$$K' = 2\,142\,434.94 \text{ gcm}^2,$$

also für beide zusammen:

$$4\,284\,650.25 \text{ gcm}^2.$$

Um diesen Betrag wird also das Moment des längsten Stabes vermehrt, wenn die Cylinder über seine Enden geschoben werden. Das Trägheitsmoment des längsten Stabes einschliesslich des von den Cylindern herrührenden hat mithin den Werth:

$$5\,212\,064.85 \text{ gcm}^2.$$

3. Graphische Methode zur Bestimmung des Trägheitsmoments.

Schliesslich bleibt es uns übrig, das Minimalmoment zu bestimmen, das Trägheitsmoment der Drehaxe und sämmtlicher mit ihr in starrer Verbindung befindlicher Theile, vorausgesetzt nur, dass die Axe keinen Stab trägt. Die directe mathematische Berechnung dieses Trägheitsmoments ist undurchführbar wegen der complicirten Gestalt der Axe. Wir müssen uns daher nach einer anderen Bestimmungsmethode umsehen und wählen dazu die graphische. Wir wollen nämlich das Minimalmoment bestimmen aus derjenigen Curve, die man auf der rotirenden Trommel gewinnt, wenn das System durch ein an der Rolle vom Radius R hängendes Gewicht von der Anfangslage aus bewegt wird. Dazu brauchen wir die Differentialgleichung dieser Bewegung. Da diese letztere keine rein rotatorische ist, weil das Gewicht eine fortschreitende Bewegung macht, wenn die Axe sich dreht, so wird auch die Differentialgleichung der Bewegung nicht übereinstimmen mit derjenigen der Rotation eines starren Körpers. Die Differentialgleichung der Drehbewegung sagt aus, dass die Winkelbeschleunigung des um eine Axe rotirenden starren Körpers direct proportional dem Drehungsmoment jenes Körpers und umgekehrt

Digitized by Google

proportional seinem Trägheitsmomente ist, beide Momente bezogen auf die Drehaxe. Ueber die Ableitung der gesuchten Differentialgleichung giebt Anhang II. Auskunft; hier wollen wir uns begnügen, ihr Resultat anzugeben.

Bezeichnen wir wie früher den Drehwinkel mit φ, so ist die Winkelgeschwindigkeit $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$, und die Winkelbeschleunigung $\frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\varphi}{dt^2}$, unter t die Zeit verstanden, welche wir vom Beginn der Bewegung ab rechnen wollen. Wenn wir J das gesuchte Trägheitsmoment und $P = MG$ das an der Rolle vom Radius R hängende Gewicht nennen, so lautet die gewünschte Gleichung:

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} = \frac{MGR}{J + MR^2}.$$

Sie stimmt also der Form nach mit der Differentialgleichung der Rotation eines starren Körpers um eine Axe überein; ein Unterschied wird nur dadurch bedingt, dass in der Gleichung der zu untersuchenden Bewegung zu dem Trägheitsmomente J der Axe und der starr mit ihr verbundenen Theile der Zuwachs MR^2 tritt. Die Untersuchung der Bewegung geschieht also ebenso wie die einer rein rotatorischen, bei welcher das Trägheitsmoment J vermehrt worden ist um dasjenige eines materiellen Punktes von der Masse M des belastenden Gewichts, welcher Punkt sich an beliebiger Stelle der Rollenperipherie vom Radius R befindet.

Unsere Differentialgleichung fruchtbar zu machen für die Trägheitsmomentbestimmung, müssen wir sie zunächst integriren. Bedenken wir, dass die Bewegung mit der Anfangsgeschwindigkeit Null beginnt, so erhalten wir für das erste Integral:

$$\omega = \frac{MGR}{J + MR^2} \cdot t,$$

denn es ist vorausgesetzt worden, dass die Zeit vom Anfang der Bewegung ab gerechnet werde.

Da ferner das System die Bewegung von der Ausgangslage aus beginnt, also für $t = 0$ auch $\varphi = 0$ ist, wenn wir den Drehwinkel φ von der Horizontalen ab rechnen, so nimmt das zweite Integral unserer Gleichung die Form an:

$$2\varphi = \frac{MGR}{J + MR^2} \cdot t^2.$$

Digitized by Google

Wegen $s = R\varphi$ hat man auch:

$$2s = \frac{MGR^2}{J + MR^2} \cdot t^2.$$

Wenn wir zur Erkennung des Charakters der verzeichneten Curve noch berücksichtigen, dass $t = \varkappa T$ und bis zu einer schon angegebenen oberen Grenze $s = \lambda S$ ist, so erhalten wir:

$$2\lambda S = \frac{MGR^2 \varkappa^2 T^2}{J + MR^2},$$

und wird schliesslich zur Abkürzung die Constante

$$\frac{\lambda (J + MR^2)}{MGR^2 \varkappa^2} = p$$

gesetzt:

$$T^2 = 2pS.$$

Die aufgeschriebene Curve ist also der Bogen einer Parabel, deren Hauptaxe senkrecht zur Abscissenaxe steht, und die von der letzteren im Scheitel berührt wird.

Zur Bestimmung des Parameters p würde es genügen, mit den Coordinaten S, T eines einzigen Parabelpunktes die Function $p = \frac{T^2}{2S}$ zu bilden. Es wurden jedoch die Coordinaten mehrerer Punkte der aufgeschriebenen Parabel gemessen, nur keine so hoch über der Abscissenaxe gelegenen, dass dadurch die Giltigkeit der Formel $s = \lambda S$ gestört worden wäre.

Mit Hilfe der Coordinaten eines jeden Punktes wurde die Function p gebildet und der Mittelwerth aus den dabei sich ergebenden Einzelwerthen der Berechnung zu Grunde gelegt.

Mit der Bestimmung des Parameters p ist aber die des Trägheitsmoments erledigt. Denn in der Gleichung:

$$\frac{\lambda (J + MR^2)}{MGR^2 \varkappa^2} = p,$$

aus welcher:

$$J + MR^2 = \frac{pMGR^2 \varkappa^2}{\lambda}$$

und:

$$J = MR^2 \left(\frac{pG\varkappa^2}{\lambda} - 1\right)$$

hervorgeht, kommen ausser J nur bekannte Grössen vor. λ ist $= \frac{3}{4}$, $\varkappa$, die Constante der Trommelgeschwindigkeit, war bei den Versuchen der vorliegenden Art $= 0.027\ \mathrm{cm}^{-1}\ \mathrm{sec}$, die Beschleunigung der

Digitized by Google

Schwere, die wir zur Unterscheidung vom Massenmaass mit G bezeichnen wollen, hat den Werth: 980.6 cm sec^{-2} und R, der Radius der Rolle, an welcher sonst die Muskelkraft angreift, beträgt 3.88 cm. M, die Masse des treibenden Gewichts, wurde gewählt $= 98.93$ g; drückt man also schliesslich den Parameter p in cm aus, so wird das gesuchte Trägheitsmoment J gemessen in gcm^2, ist daher mit den früher bestimmten Trägheitsmomenten direct vergleichbar.

Als Mittelwerth für p aus einer Reihe von Versuchen wurde gefunden:

$$p = 1.52 \text{ cm}.$$

Damit ergiebt sich für J der Werth:

$$J = 668.34 \text{ gcm}^2.$$

Es ist zu beachten, dass bei Anwendung der graphischen Methode der numerische Werth des Trägheitsmoments stets nur zu gross gefunden werden kann. Denn da die Bewegung unseres Systems vom Einfluss der Reibung nicht ganz frei ist, und die letztere als eine Kraft sich darstellt, welche die Winkelgeschwindigkeit des Systems zu verringern strebt, so sehen wir aus der Form des ersten Integrals unserer Differentialgleichung:

$$J + MR^2 = \frac{MGRt}{\omega},$$

dass, wenn die Winkelgeschwindigkeit ω verkleinert wird, dadurch die Summe $J + MR^2$, und damit J selbst sich vergrössert.

Den für J erhaltenen Werth haben wir nun jedem der früher berechneten Trägheitsmomente hinzuzufügen. Mit Einschluss des Minimalmoments J selbst ergeben sich also die Maasszahlen der folgenden 14 benutzten Trägheitsmomente:

668.34	gcm^2,	33 695.38	gcm^2,
1 499.09	- ,	57 616.28	- ,
3 623.37	- ,	111 787.47	- ,
7 795.16	- ,	262 116.65	- ,
12 022.81	- ,	511 318.19	- ,
17 386.09	- ,	928 082.94	- ,
24 868.99	- ,	5 212 733.19	- .

Diese Trägheitsmomente verhalten sich wie 1 : 2.24 : 5.42 : 11.66 : 17.99 : 26.01 : 37.21 : 50.42 : 86.21 : 167.3 : 392.2 : 765.2 : 1388.6 : 7799.5.

Digitized by Google

4. Die feuchte Kammer.

Die feuchte Kammer wird von einem cylindrischen Glassturz und von einer kreisförmigen Platte aus Hartgummi gebildet. In die Platte ist nahe dem Rande eine Rinne gedreht; in ihrer Mitte ist sie von einem Loch durchbohrt. Die Rinne nimmt den an seiner Innenfläche mit stark durchfeuchtetem Fliesspapier umkleideten Glassturz auf. Durch das centrale Loch lässt sich ein Faden vom unteren Ende des Muskels bis zur Rolle vom Radius *R* führen. Auf der Bodenplatte erheben sich zwei Stative; das eine, grössere, ist oben mit einer Zange zur Befestigung des Muskelpräparats versehen. Das andere kleinere Stativ trägt die unten zu beschreibende Thermosäule. Das zu meinen Versuchen benutzte Präparat ist dasjenige, welches Fick[1]) mit folgenden Worten beschreibt: »Präparirt man von beiden Schenkeln des Frosches die Muskelmassen, welche auf der inneren Seite des Oberschenkels vom Becken zur Tibia überspringen und nimmt die sämmtlichen übrigen Muskeln, sowie auch noch den Sartorius und Biceps nebst dem Schenkelknochen fort, befestigt sodann das Becken mit senkrechter Medianebene, so hängen die präparirten Muskelmassen in breiter Fläche einander innigst berührend senkrecht herab, als wären sie eine zusammenhängende Masse.«

5. Die Thermosäule.

Die der Fick'schen[2]) ähnliche, von Herrn Mechanikus Petzold hier angefertigte plattenförmige Thermosäule bestand aus 40 Neusilber-Eisen-Elementen. Um der Säule möglichst freie Beweglichkeit zu sichern, war dieselbe sowohl in verticaler Richtung verschiebbar, als auch um eine verticale Axe drehbar. Zur vollkommenen Isolation der Säulenenden, deren eines zwischen die Muskelmassen eingeschoben wurde, während das andere mit feuchtem Fliesspapier umhüllt war, habe ich dieselben mit dünnen Guttapercha-Häutchen umkleidet. Denn das Bestreichen der Enden der Säule mit Lack, den ich vorher zu demselben Zwecke anwandte, bewährte sich nicht, da ich bemerkte, dass sich vom Reizstrom herrührende Stromzweige in die

1) Pflüger's Arch., 1878, XVI, S. 65.
2) Pflüger's Arch., 1878, XVI, S. 65 u. 66.

Digitized by Google

Galvanometerleitung ergossen und den durch die Temperaturerhöhung des zuckenden Muskels bedingten Nadelausschlag je nach der Richtung des primären Stromes entweder vergrösserten oder verkleinerten. Dieser Uebelstand aber fiel sofort und vollständig weg, als ich, wie erwähnt, die Enden des Elements mit Guttapercha umhüllte. Selbstverständlich habe ich nicht versäumt, die vor der Einhüllung in Guttapercha aufgetragene Lackschicht sorgfältig wieder zu entfernen.

6. Das Galvanometer.

Mein von Hartmann und Braun in Bockenheim bei Frankfurt a/M. bezogenes Spiegelgalvanometer ist nach den Angaben von F. Kohlrausch construirt und in Poggendorff's Annalen, Neue Folge, XV, Seite 554 und 555 beschrieben. Die Drahtwindungen bestehen bei diesem Instrument aus je einem Paar dünn- und dickdrähtiger Lagen. Auf den Gebrauch der letzteren war ich bei meinen Versuchen angewiesen. Die beiden Drahtrollen wurden nebeneinander eingeschaltet, so dass, da jede derselben einen Widerstand von 14.2 Ohm besass, ein Widerstand von 7.1 Ohm im Galvanometer vorhanden war. Um grossen Schwankungen in der Gleichgewichtslage des Magnets zu entgehen, arbeitete ich bei nur mässigem Astasirungsgrade. Ferner gelang es mir dadurch, dass ich die zum Instrument gehörige kupferne Dämpfungshülse nahezu ganz über die Nadel hinwegschob, die Schwingungen des Magnets so stark zu dämpfen, dass derselbe bie der durch die Muskelzuckung hervorgerufenen Temperaturerhöhung des vorderen Endes der Thermosäule nur einen Ausschlag machte, dessen Grösse ich vermittelst Fernrohr und Scala beobachtete. Die letztere war während der ganzen Dauer der Versuche 450 cm vom Magnetspiegel entfernt.

7. Empfindlichkeit des wärmemessenden Apparats.

Zur Messung der Empfindlichkeit des thermoelektrischen Apparats verfuhr ich in derselben Weise wie Heidenhain[1]). Zwei an den Seiten mit rechteckigen, dem Säulenquerschnitt gleichen Oeffnungen versehene cylindrische Glasgefässe, in welche die Säulenenden mit Stearin ein-

1) Mechanische Leistung, u. s. w., S. 79.

Digitized by Google

gekittet waren, wurden mit Wasser gefüllt, dessen Temperatur durch zwei von Herrn Glasbläser GÖTZE hier angefertigte, in 50-tel Grade getheilte und vorher mit einander verglichene Thermometer eine genaue Bestimmung zuliess. Die Quecksilbergefässe der Thermometer befanden sich in möglichst grosser Nähe der Enden der Thermosäule.

Wurde nun die letztere in die nach dem Galvanometer führende Leitung eingeschaltet, so machte die Nadel je nach der Temperaturdifferenz der Löthstellen einen mehr oder weniger beträchtlichen Ausschlag. Eine Reihe an verschiedenen Tagen angestellter und in guter Uebereinstimmung befindlicher Versuche führten mich zu dem Ergebniss, dass jedem Millimeter der in 1000 Theile getheilten Scala eine Temperaturdifferenz der Löthstellen von 0.00014° C. entsprach. Da halbe Millimeter der Scala bequem geschätzt werden konnten, war es mir mithin möglich, eine Temperaturdifferenz von 0.00007° C. noch zu bestimmen.

II. Arbeitsleistung und Wärmeentwickelung.

1. Discussion der Muskelcurve.

Die Curve beginnt mit einem gegen die Abscissenaxe convexen Theil, an welchen sich ein concaves Stück schliesst. Die Uebergangsstelle von Convexität zu Concavität bildet der Wendepunkt. Im Anfang der Bewegung ist, wie HELMHOLTZ in der bereits citirten Arbeit[1]) für die Curve gezeigt hat, welche vom Muskel bei frei hängendem Gewicht geschrieben wird, die Muskelkraft der Schwere des angehängten Gewichts gleich, nur entgegengesetzt gerichtet, während sie später bis zum Wendepunkte, in welchem zwischen beiden Kräften wieder Gleichgewicht herrscht, grösser ist, als die Anfangsspannung. Es wird also eine zwischen Anfangspunkt und Wendepunkt gelegene Curvenstelle geben, in welcher die Muskelkraft ein Maximum erreicht. Für den im Wendepunkte anhebenden concaven Curventheil ist die Muskelkraft beständig geringer als die Anfangsspannung, und die Resultante beider Kräfte hat mithin die Richtung der Schwere, während sie vorher vertical

1) MÜLLER's Arch., 1850, S. 281 u. 282.

Digitized by Google

nach oben gerichtet war. Sollte sich, wie es bei der isotonischen Curve stets der Fall ist, im absteigenden Theile der Bewegung an das concave Curvenstück ein zweites convexes schliessen, sodass die hier zu betrachtende Curve gleich der isotonischen einen zweiten Wendepunkt besässe, so würde für jenes zweite gegen die Axe der Abscissen convexe Curvenstück die Resultante von Muskelkraft und Schwerkraft gleichfalls vertical nach oben gerichtet sein, wie im convexen Theil des aufsteigenden Curvenzweigs. Es hat sich jedoch herausgestellt, dass nur die bei Anwendung des minimalen Trägheitsmoments verzeichneten Curven einen Wendepunkt auch im absteigenden Theile besitzen, worauf ich zurückkomme.

Bisher haben wir noch keinen Aufschluss darüber erhalten, wie wir die Muskelkraft nicht nur im Anfang und im Wendepunkte, an welchen Stellen diese Kraft der Anfangsspannung ihrem absoluten Betrage nach gleich ist, sondern in jedem Punkte der Curve mit Hilfe derselben bestimmen können. Namentlich interessirt uns derjenige zwischen Anfangspunkt und Inflexion gelegene Curvenpunkt, in welchem die Muskelkraft ein Maximum erreicht. Zur Ausführung jener Bestimmung der Muskelkraft nennen wir S und T die Coordinaten des laufenden Curvenpunktes und denken uns die eine Coordinate als Function der anderen, etwa die Ordinate S als Function der Abscisse T, dann wird $S = S(T)$ die Gleichung der Muskelcurve sein. Es wird aber nicht behauptet, dass es möglich sei, die Muskelcurve in ihrem ganzen Verlaufe durch eine einzige Gleichung darzustellen. Dass dies unmöglich ist, wird unten gezeigt werden.

Solange nun die Curve gegen die Abscissenaxe convex ist, hat bekanntlich ihr zweiter Differentialquotient $\frac{d^2S}{dT^2}$ einen positiven Werth; ist die Curve gegen die Abscissenaxe concav, so ist $\frac{d^2S}{dT^2} < 0$, und im Wendepunkte ist $\frac{d^2S}{dT^2} = 0$.

Ferner haben wir zu bedenken, dass auch für die Muskelbewegung eine Differentialgleichung besteht, welche ebenso wie die zur Trägheitsmomentbestimmung angewandte mit der Differentialgleichung der Rotation der Form nach übereinstimmt.

Zur Aufstellung dieser Gleichung nennen wir wieder $P = MG$ das zur Belastung des Muskels dienende Gewicht, welches aber jetzt

Digitized by Google

zum Unterschied von den Versuchen zur Trägheitsmomentbestimmung an der Axe vom Radius r hing. Das von diesem Gewicht herrührende Drehungsmoment ist also $Pr = MGr$. Bezeichnen wir ferner die der Richtung nach constante, der Grösse nach aber mit der Zeit veränderliche, unbekannte Muskelkraft mit $Q = Q(t)$, so hat das Drehungsmoment dieser Kraft den Werth QR, da die Muskelkraft an der Rolle vom Radius R angreift. Beide Momente aber sind ungleichsinnig, denn die Muskelkraft wirkt senkrecht nach oben, die Schwerkraft senkrecht nach unten. Ziehen wir also senkrecht nach oben wirkende Kräfte als positiv und demzufolge senkrecht nach unten wirkende als negativ in Rechnung, so ist ein Gesammtdrehungsmoment $QR - Pr = QR - MGr$ vorhanden.

Das Trägheitsmoment der Axe und sämmtlicher mit ihr in starrer Verbindung befindlicher Theile werde J genannt. Es soll also jetzt J ein beliebiges der von uns angewandten Momente bedeuten, gerade wie $P = MG$ irgend eine der von uns benutzten Anfangsspannungen darstelle. Diesem Trägheitsmoment J ist nun ähnlich dem Früheren das Trägheitsmoment Mr^2 eines materiellen Punktes von der Masse M der Belastung hinzuzufügen, welcher Punkt als an beliebiger Stelle der Peripherie der Axe vom Radius r befindlich gedacht werden muss. Wir gelangen also zu einem Gesammtträgheitsmoment vom Werthe $J + Mr^2$.

Dividiren wir aber das Gesammtdrehungsmoment durch das Gesammtträgheitsmoment, so erhalten wir die Winkelbeschleunigung $\frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\varphi}{dt^2}$ der von dem Muskel verursachten Bewegung unseres Systems. Mithin ist die gesuchte Differentialgleichung die folgende:

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} = \frac{QR - Pr}{J + Mr^2}, \quad P = MG.$$

Es bleibt uns jetzt noch übrig, die Curvengleichung $S = S(T)$ in Beziehung zu setzen zu der erhaltenen Differentialgleichung. Dazu dienen die folgenden Formeln, worin S, T die laufenden Coordinaten der Muskelcurve und s die dem Drehwinkel φ zugehörige Grösse der Fadenabwickelung bedeuten, während der Reductionsfactor $\lambda = \frac{3}{4}$ und $\varkappa$ die Constante der Trommelgeschwindigkeit ist:

$$s = R\varphi, \quad s = \lambda S, \quad t = \varkappa T,$$

von denen aber die zweite nur bis zu einer gewissen, früher

Digitized by Google

angegebenen, oberen Grenze Giltigkeit besitzt. Da aber Hubhöhen S, welche jenseits dieser Grenze liegen, nur sehr selten vorkommen, so reicht die einfache Beziehung $s = \lambda S$ vollständig aus zur Darstellung des sonst sehr complicirten Zusammenhangs zwischen s und S. Mit Hilfe der obigen drei Formeln aber lässt sich die Winkelbeschleunigung $\frac{d^2\varphi}{dt^2}$ ausdrücken durch den zweiten Differentialquotienten $\frac{d^2S}{dT^2}$ der Muskelcurve; man hat nämlich:

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} = \frac{\lambda}{R\varkappa^2}\frac{d^2S}{dT^2},$$

und unter Einsetzung dieses Werthes für die Winkelbeschleunigung in die Differentialgleichung der zu untersuchenden Bewegung gewinnt jene Gleichung die Form:

$$\frac{\lambda}{R^2\varkappa^2}\frac{d^2S}{dT^2} = \frac{Q - P\frac{r}{R}}{J + Mr^2}.$$

In der hier vorliegenden Form steht im Zähler des auf der rechten Seite der Gleichung befindlichen Bruches die Muskelkraft Q, dieselbe vermindert um die Anfangsspannung $P\frac{r}{R}$ des Muskels. Setzen wir also die Resultante der wirksamen Kräfte:

$$Q - P\frac{r}{R} = W$$

und nennen μ^2 die positive Constante $\frac{\lambda(J + Mr^2)}{R^2\varkappa^2}$, so können wir die obige Differentialgleichung auch schreiben in folgender Form:

$$\mu^2\frac{d^2S}{dT^2} = W.$$

Mit Hilfe dieser Beziehung finden wir die oben angegebenen Resultate wieder.

Zunächst geht aus der aufgestellten Gleichung hervor, dass gleichzeitig mit $\frac{d^2S}{dT^2} \gtreqless 0$ auch $W \gtreqless 0$ ist. Bis zum Beginn der Muskelbewegung herrscht nun Gleichgewicht zwischen der Muskelkraft $Q = Q(T)$ und der Anfangsspannung $P\frac{r}{R}$; also ist dann mit $W = 0$ gleichzeitig auch $\frac{d^2S}{dT^2} = 0$. Alsdann aber ist, wie wir oben sahen, $\frac{d^2S}{dT^2} > 0$, mithin auch $W > 0$, $Q > P\frac{r}{R}$, d. h. solange der auf-

Digitized by Google

steigende Theil der Muskelcurve gegen die Abscissenaxe convex ist, hat die Kraftresultante W einen positiven Werth, ist also senkrecht nach oben gerichtet. Für die Uebergangsstelle von Convexität zu Concavität, für den Wendepunkt, ist $\frac{d^2 S}{d T^2} = 0$, $W = 0$, $Q = P\frac{r}{R}$; d. h. in diesem Falle ist die Kraftresultante Null, die Muskelkraft ihrem absoluten Betrage nach der Schwerkraft gleich. Für den an den convexen sich schliessenden concaven Curventheil ist $\frac{d^2 S}{d T^2} < 0$, $W < 0$, $Q < P\frac{r}{R}$; die Richtung der Resultante W fällt zusammen mit derjenigen der Schwerkraft, und die Muskelkraft Q ist ihrem absoluten Betrage nach kleiner als die Anfangsspannung.

Durch Auflösung der Differentialgleichung nach der Muskelkraft Q ergiebt sich:

$$Q = P\frac{r}{R} + \mu^2 \frac{d^2 S}{d T^2}.$$

Die Bestimmung der Kraft Q in einem beliebigen Punkte der Curve fällt mithin im Wesentlichen zusammen mit der Bestimmung des zweiten Differentialquotienten der Curve in demselben Punkte. Was insbesondere das Maximum von Q betrifft, so ist für dasselbe $\frac{dQ}{dT} = 0$ oder $\frac{d^3 S}{d T^3} = 0$. Die Muskelkraft erreicht daher an derjenigen zwischen Anfangspunkt und Wendepunkt gelegenen Curvenstelle ihr Maximum, für welche der dritte Differentialquotient dieser Curve verschwindet. Ist also

$$\left(\frac{d^2 S}{d T^2}\right)_{\frac{d^3 S}{d T^3} = 0}$$

der Werth des zweiten Differentialquotienten für diejenige Curvenstelle, in welcher der dritte verschwindet, so erhält man für das Maximum von Q den Ausdruck:

$$Q_{Ma} = P\frac{r}{R} + \mu^2 \left(\frac{d^2 S}{d T^2}\right)_{\frac{d^3 S}{d T^3} = 0}.$$

Wir gelangen jetzt zu einer der wichtigsten Fragen, die bei der Discussion der Muskelcurve zu beantworten sind, nämlich: in welchem Punkte der Curve verschwindet die Muskelkraft? Können wir diesen Punkt überhaupt mit Hilfe der Curve finden?

Digitized by Google

Diese Frage zu entscheiden müssen wir erst die Geschwindigkeit betrachten, mit der die Bewegung unseres Systems vor sich geht. Die Winkelgeschwindigkeit desselben ist $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$, und wenn wir dieselbe ausdrücken durch den ersten Differentialquotienten der Muskelcurve:

$$\omega = \frac{\lambda}{\varkappa R} \frac{dS}{dT}.$$

Die Winkelgeschwindigkeit ist also dem Differentialquotienten $\frac{dS}{dT}$ proportional, selbstverständlich wieder unter der Voraussetzung des Bestehens der Relation $s = \lambda S$.

Bezeichnen wir die Neigung der Curve gegen die positive Richtung der Abscissenaxe mit ϑ, so haben wir bekanntlich;

$$\frac{dS}{dT} = \operatorname{tg} \vartheta;$$

mithin auch:

$$\omega = \frac{\lambda}{\varkappa R} \operatorname{tg} \vartheta.$$

Für den Beginn der Bewegung ist $\vartheta = 0$, denn die Curve berührt die Abscissenaxe, also ist dann auch $\omega = 0$, die Bewegung beginnt mit der Winkelgeschwindigkeit Null. Das ist von selbst klar, denn keine Kraft kann einer Masse in unendlich kurzer Zeit eine endliche Geschwindigkeit ertheilen.

So lange nun die Curve gegen die Abscissenaxe convex ist, ist auch ihr Neigungswinkel gegen diese Axe im stetigen Wachsthum begriffen; im Wendepunkte erreicht jener Winkel ein Maximum und nimmt von der bezeichneten Stelle an beständig ab, so dass er im höchsten Punkte der Curve wieder so gross ist, wie zu Beginn der Bewegung, nämlich Null. Da nun der Winkel ϑ einen Rechten nicht übersteigt, so gilt dasselbe, was von seinen Wachsthums- und Abnahme-Verhältnissen eben ausgesagt wurde, auch von seiner tg, und damit schliesslich von der Winkelgeschwindigkeit ω unseres Systems selbst. Diese Geschwindigkeit ist also zu Beginn der Bewegung Null, erreicht im Wendepunkt ein Maximum und ist im höchsten Punkt der Muskelcurve wieder Null.

Von der Winkelgeschwindigkeit ω des drehbaren Systems, diese Geschwindigkeit bezogen auf die Peripherie der Rolle vom Radius

Digitized by Google

R, an welcher die Muskelkraft angreift, haben wir die Verkürzungsgeschwindigkeit des Muskels selbst zu unterscheiden; oder mit anderen Worten: es ist nothwendig, einen Unterschied zu machen zwischen der Geschwindigkeit der Peripheriepunkte jener Rolle und derjenigen Geschwindigkeit, mit welcher das untere Muskelende sich hebt. Die Geschwindigkeit eines jeden Peripheriepunktes der Rolle mit dem Radius R ist $R\omega = R\frac{d\varphi}{dt}$. Nennen wir also die Verkürzungsgeschwindigkeit des Muskels v, so wird die Gleichung $R\omega = v$ oder $R\omega - v = 0$ so lange bestehen, als der den Muskel mit der Rolle verknüpfende Faden gespannt ist. Aber von demjenigen Momente ab, in welchem die Geschwindigkeit $R\omega$ nicht mehr $=$ der Verkürzungsgeschwindigkeit v, sondern grösser als dieselbe ist, wird die Bewegung des Systems lediglich unter dem Einflusse der Schwerkraft erfolgen, die Muskelcurve spiegelt also von dem bezeichneten Augenblicke ab gar nicht mehr die Bewegung des unteren Muskelendes, ist keine Zuckungscurve im engeren Sinne des Wortes, sondern eine Parabel und bleibt eine solche, so lange, bis die Schreibstiftspitze wieder die Abscisse erreicht, vorausgesetzt, dass nicht im absteigenden Theile der Bewegung die Muskelkraft wieder in Betracht kommt, der Faden sich spannt. Denn während die Parabel geschrieben wird, ist der den Muskel mit der Rolle verbindende Faden nicht gespannt. Man kann das sehr deutlich beobachten bei den langsam verlaufenden Zuckungen mit grossen Trägheitsmomenten. Unsere Muskelcurve — dieselbe vorläufig wieder nur betrachtet vom Anfangspunkte bis zum Maximum — setzt sich also aus zwei ihrer Natur nach gänzlich verschiedenen Theilen zusammen, von denen der zweite eine Parabel ist, während der erste allein die Bewegung des unteren Muskelendes wiedergiebt, aber auch nur einen Theil dieser Bewegung. Es fragt sich nun: wo liegt der Punkt, in welchem der Uebergang von der Zuckungscurve im engeren Sinne zur Parabel stattfindet? Der fragliche Punkt kann jedenfalls nicht vor dem Wendepunkte liegen. Wohl aber ist es möglich, dass bereits im Wendepunkte das System seine eigene Bewegung unabhängig von der gleichfalls noch andauernden Bewegung des Muskels beginnt. Die Muskelbewegung erreicht ihre Endschaft, wenn die Verkürzungsgeschwindigkeit $v = 0$ wird. Tritt dies Verschwinden

Digitized by Google

von v gleichzeitig mit dem Nullwerden der Winkelgeschwindigkeit $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$ ein, was ebenfalls möglich ist, so liegt der fragliche Punkt im Curvengipfel. In diesem letzteren Falle haben wir nämlich die isotonische Curve vor uns, bei welcher während des ganzen Verlaufs der Bewegung die Zuckungscurve sowohl in ihrem auf- als auch in ihrem absteigenden Theile die Bewegung des unteren Muskelendes darstellt. Im Falle der isotonischen Curve ist also kein Theil der Zuckungscurve ein Parabelbogen. Der Unterschied zwischen der isotonischen Curve und den von uns untersuchten ist der, dass für erstere die Gleichung $R\omega - v = 0$ während des ganzen Verlaufs der Muskelbewegung besteht, während für die uns vorliegenden Curven der Ausdruck $R\omega - v$ von einer gewissen zwischen Wendepunkt und Maximum gelegenen Stelle ab > 0 ist und bleibt. Diesen Punkt mathematisch zu charakterisiren können wir folgendermassen verfahren: Wir berücksichtigen, dass die Gleichung einer Parabel, deren Hauptaxe senkrecht zur Abscissenaxe steht — und um eine solche Parabel handelt es sich in unserem Falle — die Form hat:

$$S = AT^2 + BT + C,$$

worin A, B, C Constante bedeuten. Also verschwindet der dritte Differentialquotient $\frac{d^3 S}{dT^3}$ für sämmtliche Parabelpunkte. Wir können also beispielsweise sagen: Die in Frage kommende Stelle ist der erste zwischen Inflexion und Maximum gelegene Punkt, für welchen der dritte Differentialquotient der Muskelcurve verschwindet.

Die wichtige Frage: während welcher Zeit und bis zu welchem Bruchtheil seiner Länge verkürzt sich der Muskel, kann also bei der getroffenen Versuchsanordnung gar nicht beantwortet werden. Man müsste dazu vielmehr ein Mittel haben, welches gestattete, auch die Bewegung des Muskels nach dem Passiren jener kritischen Stelle aufzuschreiben, von welcher ab Muskel und System eigene Wege gehen. Die Beantwortung jener Frage müssen wir daher vorläufig zurückstellen, indem wir uns vorbehalten, sie zum Gegenstand einer besonderen Untersuchung zu machen.

Schliesslich bleibt es übrig, des absteigenden Theils der von dem Muskel ausgelösten Bewegung zu gedenken. Es ergab sich, dass mit Ausnahme der bei Anwendung des Minimalträgheitsmoments

Digitized by Google

verzeichneten Muskelcurven der absteigende Theil der Curve in seinem ganzen Verlaufe vom Maximum bis zur Abscisse als eine Parabel, d. h. als eine Fallcurve, sich darstellt, mithin die Bewegung nach bekannten Gesetzen sich vollzieht. Was aber die mit dem Minimalmoment geschriebenen Curven betrifft, so erreichte, wenigstens bei geringen Anfangsspannungen, im absteigenden Theile der Bewegung die Schreibstiftspitze die Abscisse nicht, sondern näherte sich ihr nur asymptotisch. Dieser Umstand deutet darauf hin, dass die bei Benutzung des Minimalmoments gewonnenen Curven vielleicht noch als isotonische betrachtet werden dürfen.

Recapitulirung.

Die Muskelkraft ist im Anfang der Bewegung des Systems ihrem absoluten Betrage nach der Anfangsspannung gleich, wächst dann bis zu einer vor der Inflexion gelegenen, geometrisch in keiner Weise charakterisirten Curvenstelle, für welche der dritte Differentialquotient der Curve verschwindet und verringert sich von jenem Punkte ab beständig, sodass sie im Wendepunkte nur noch so gross ist, als sie zu Beginn der Bewegung war. Wie lange und um welchen Bruchtheil seiner Länge der Muskel sich verkürzt, kann nicht entschieden werden, weil von einem zwischen Inflexion und Curvenmaximum gelegenen Punkte ab der Muskel seine Bewegung unabhängig von der des Systems fortsetzt und vollendet. Von jenem Punkte ab ist die Muskelcurve mit Ausnahme der bei Anwendung des minimalen Trägheitsmoments und geringer Anfangsspannungen gewonnenen Curven eine Parabel.

Die Verkürzungsgeschwindigkeit des Muskels ist zu unterscheiden von der auf den Umfang der Rolle, an welcher die Muskelkraft angreift, bezogenen Winkelgeschwindigkeit des Systems.

Beide Geschwindigkeiten stimmen bis zu der erwähnten Stelle, in welcher der Uebergang von der Muskelcurve im engeren Sinne zur Parabel stattfindet, überein; später aber nimmt die Muskelgeschwindigkeit schneller ab, als die des Systems. Das Geschwindigkeitsmaximum tritt im Wendepunkt ein.

Digitized by Google

2. Bestimmung des Wendepunktes durch die grössten Ordinaten- oder die kleinsten Abscissendifferenzen.

Aus dem Umstande, dass der zweite Differentialquotient der Curve für den Wendepunkt verschwindet, entspringen zwei wesentlich nicht von einander verschiedene Methoden, denselben zu bestimmen.

A. Hat man für eine Reihe von Punkten sowohl des convexen, als des concaven Curventheils, deren aufeinander folgende Abscissen sich um dasselbe Stück Δx unterscheiden, die zugehörigen Ordinaten gemessen, so wird die Differenz zweier aufeinander folgender Ordinaten für dasjenige Intervall, in welchem der gesuchte Wendepunkt gelegen ist, ein Maximum erreichen. Darauf aber ist wohl zu achten, dass man nur ein Intervall angeben kann, innerhalb welches der gesuchte Punkt liegt. Je kleiner man aber die Abscissendifferenz Δx wählt, in desto engere Grenzen kann man auch den zu bestimmenden Punkt einschliessen.

B. Ist die Punktreihe auf der Curve so angeordnet, dass aufeinander folgende Ordinaten um dasselbe Stück Δy differiren, so erreicht der Unterschied zweier aufeinander folgender Abscissen für das Intervall, innerhalb welches der Wendepunkt liegt, ein Minimum.

3. Messung der Coordinaten der Curvenpunkte.

Zur Messung der Coordinaten standen mir zwei Apparate zur Verfügung. Jeder von beiden bestand im Wesentlichen aus zwei aufeinander senkrechten Maasstäben, von denen der eine fest war, der andere aber eine Verschiebung parallel sich selbst gestattete.

A. Messapparat bei constanter Abscissen- und maximaler Ordinatendifferenz. Der eine Apparat[1]), bei dessen Anwendung zur Messung der Coordinaten behufs Bestimmung des Wendepunktes ich die erste der beiden oben auseinandergesetzten Methoden zu Grunde zu legen hatte, besass einen festen verticalen Maasstab, während der horizontale Maasstab längs des verticalen sich verschieben liess. Mit Hilfe eines Nonius konnten am verticalen Maasstab des Apparats Zehntel-Millimeter abgelesen werden und halbe Zehntel-Millimeter

1) Abgebildet in dem Katalog des Herrn Mechanikus Petzold.

Digitized by Google

waren noch bequem zu schätzen. Der bewegliche horizontale zur Messung der Abscissenlänge dienende Maasstab war in Millimeter getheilt. Die exacte Einstellung des beweglichen Maasstabes auf die Punkte der Curve und die Ablesung des Nonius wurde stets mit Hilfe einer mässig vergrössernden Lupe vorgenommen.

B. Messapparat bei contanter Ordinaten- und minimaler Absissendifferenz. Der andere Messapparat, dessen Abbildung Taf. I zeigt, besitzt einen festen horizontalen Maasstab *a* und einen beweglichen verticalen Stab *b*. Beide Stäbe sind in Millimeter getheilt. Die Verschiebung des beweglichen Maasstabes geschieht aber hier nicht mit der Hand, wie bei dem vorhin beschriebenen Instrument, sondern vermittelst der Mikrometerschraube *c*, welche auch die Grösse der Verschiebung zu messen gestattet, sodass dadurch bei der Anwendung des Apparats zur Wendepunktsbestimmung, wobei ich die zweite der oben dargelegten Methoden zu benutzen hatte, der feste horizontale Maasstab nur zur rohen Ablesung diente.

Der Mantel des cylindrischen Schraubenkopfes ist nämlich in 50 Theile getheilt, und da die Schraube eine Ganghöhe von 0.5 mm besitzt, so entspricht einer Drehung der Schraube um den fünfzigsten Theil ihres Umfangs eine Verschiebung des Maasstabes um 0.01 mm. Das in Anhang IV. niedergelegte Zahlenmaterial einer Reihe von Versuchen ist jedoch, soweit es sich auf Coordinatenmessungen bezieht, nicht mit Hilfe dieses Apparats gewonnen worden, sondern bei Benutzung des ersteren, weil der letztere früher mit einem inzwischen beseitigten Mangel behaftet war, der die Vortheile, die der Apparat sonst vor dem ersten voraus hat, illusorisch machte. Die Mikrometerschraube *c* ist nämlich auf einer Schiene montirt, welche, um die Variation der Ausgangslage des beweglichen Stabes zu ermöglichen, gleichfalls beweglich ist, und zu deren Fixirung die Druckschraube *d* dient. Früher war nun die Einrichtung getroffen, dass die Bewegung der Mikrometerschraube zunächst auf eine dem beweglichen Maasstabe zugekehrte und mit demselben während der Messung in steter Berührung befindliche »Nase« übertragen wurde, welche den verticalen Maasstab bei der Drehung der Mikrometerschraube vor sich herschob. Dabei aber erfolgte die Bewegung des Stabes wegen der wenn auch nur sehr geringen Reibung in seiner Führung nicht immer genau sich selbst

Digitized by Google

parallel und gab so zu Ungenauigkeiten der Coordinatenmessung Anlass. Diesem Uebelstande ist nun dadurch abgeholfen worden, dass der Maasstab an der von der Mikrometerschraube bewegten Nase befestigt wurde. Die beigegebene Taf. I stellt eine Zeichnung des verbesserten Apparates dar.

4. Lage des Wendepunktes bei den Versuchen mit constanter Anfangsspannung und variabelem Trägheitsmoment.

Um den Text nicht durch besonders lange Zifferreihen zu unterbrechen, habe ich mir gestattet, das gesammte Zahlenmaterial einer ganzen Reihe von Versuchen, die ich für wohlgelungen halte, einem Anhange zu überweisen, sodass ich im Text jenem Anhange nur soviel Zahlen entlehne, als ich unumgänglich brauche.

Zu bemerken ist, dass in sämmtlichen Versuchen die Abscissen vom Momente des Reizeintritts ab, der in leicht ersichtlicher Weise auf der Trommel markirt werden kann, gerechnet wurden.

Versuch V.

Die constante Anfangsspannung betrug bei diesem Experiment 21.88 g. Jedem Millimeter Abscissenlänge entspricht eine Zeit von 0.0034 sec. Sämmtliche Ordinaten wurden im Abstand von je 1 mm gemessen.

Minimalträgheitsmoment.

Gemessen wurden die Ordinaten, denen die Abscissen 2, 3, ..., 10 mm zugehören. Die Reihen der Abscissen, der zugehörigen Ordinaten und der ersten Ordinatendifferenzen lauten:

Abscisse	Ordinate	Ordinatendifferenz
2	0.15	
3	0.85	0.70
4	2.05	1.20
5	3.35	1.30
6	4.70	1.35
		1.35

Abscisse	Ordinate	Ordinatendifferenz
		1.35
7	6.05	1.30
8	7.35	1.25
9	8.60	1.10
10	9.70	

Aus der regelmässigen Zu- und Abnahme der Glieder der Differenzenreihe sind wir also berechtigt, auf die Regelmässigkeit des Verlaufs der Zuckungscurve zu schliessen, wie ich überhaupt in der grossen Mehrzahl aller Fälle Curven erhalten habe, die, was die Regelmässigkeit ihres Verlaufs betrifft, nichts zu wünschen übrig lassen.

Digitized by Google

In der Reihe der Ordinatendifferenzen finden sich die beiden gleichen Maxima 1.35 vor. Die Länge des Grenzintervalls der Abscissenaxe, innerhalb dessen man den Endpunkt der Inflexionsabscisse zu suchen hat, beträgt mithin 7 — 5 = 2. Verlegen wir also das Ende der Wendepunktsabscisse in die Mitte des Intervalls, wodurch wir bei der überhaupt nicht ganz zu vermeidenden Willkür in der Bestimmung des Wendepunkts den geringsten Fehler begehen, so ist die der Inflexion zukommende Zeit $T = 6$. Derselben entspricht die Ordinate $S = 1.70$.

Stab (12).[1]

Die Zahlenreihen, welche den im vorigen Versuche stehenden entsprechen, sind die folgenden:

Abscisse	Ordinate	Ordinatendifferenz
3	0.20	
		0.30
4	0.50	
		0.50
5	1.00	
		0.90
6	1.90	
		0.95
7	2.85	
		1.10
8	3.95	
		1.35
9	5.30	
		1.20
		1.20
10	6.50	
		1.20
11	7.70	
		1.10
12	8.80	
		1.10
13	9.90	
		1.10
14	11.00	
		1.10
15	12.10	

Es ist also nur ein Maximum in der Reihe der ersten Ordinatendifferenzen vorhanden. Als Inflexionsabscisse ist das arithmetische Mittel der Abscissen $T = 8$ und $T = 9$ zu nehmen. Also ist die Abscisse des Wendepunkts $T = 8.5$, welcher die Ordinate $S = 4.65$ entspricht.

Stab (18).

Abscisse	Ordinate	Ordinatendifferenz
5	0.60	
		0.55
6	1.15	
		0.70
7	1.85	
		0.75
8	2.60	
		1.00
9	3.60	
		1.00
10	4.60	
		1.10
11	5.70	
		1.10
12	6.80	
		1.10
		1.10
13	7.90	
		1.10
14	9.00	
		1.00
15	10.00	
		1.00
16	11.00	
		1.00
17	12.00	
		1.00
18	13.00	
		1.00
19	14.00	
		1.00
20	15.00	

1) Die eingeklammerte Ziffer bezeichnet hier wie immer die angenäherte Stablänge in cm.

Digitized by Google

In der zu diesem Versuch gehörigen Differenzenreihe finden sich bereits vier gleiche Maxima 1.10 vor. Die Inflexionsabscisse ist $\frac{10 + 14}{2} = 12$ und ihre Ordinate 6.80. Das Auftreten einer grösseren Anzahl gleicher Maxima bildet einen unbeseitigbaren Mangel der Methode, dem ich durch Anwendung eines anderen Verfahrens abzuhelfen suchen werde.

Stab (18) wiederholt.

Abscisse	Ordinate	Ordinaten-differenz	Abscisse	Ordinate	Ordinaten-differenz
5	0.30	0.40	14	7.85	1.05
6	0.70	0.55	15	8.90	1.05
7	1.25	0.65	16	10.00	1.10
8	1.90	0.80	17	11.00	1.00
9	2.70	1.00	18	11.95	0.95
10	3.70	1.00	19	12.90	0.95
11	4.70	1.10	20	13.85	0.95
12	5.80	1.00	21	14.75	0.90
13	6.80	1.05	22	15.65	0.90

In diesem Versuche ist die Muskelschrift wenig gelungen, denn die beiden einander gleichen Maxima 1.10 der Reihe der Ordinatendifferenzen folgen nicht unmittelbar auf einander. Da ein Zwischenglied sich um mehr als 0.05 mm von diesen grössten Werthen unterscheidet, so darf wohl nicht vorausgesetzt werden, dass ein Messungsfehler vorliege; man ist also gezwungen anzunehmen, dass die Curve nicht nur einen, sondern zwei Wendepunkte habe, welchen die Abscissen $T = 11.5$ und $T = 15.5$ zukommen würden. Dies deutet darauf hin, dass die Bewegung nicht ohne Eigenschwingungen des Systems vor sich gegangen sei. Gestattet man sich jedoch, von beiden Inflexionsabscissen das arithmetische Mittel zu nehmen, so erhält man dafür einen Werth $T = 13.5$, welcher sich von dem der vorigen, unter denselben Bedingungen verzeichneten Curve, nämlich $T = 12.0$, nicht allzusehr unterscheidet. Zu $T = 13.5$ gehört als Ordinate $S = 7.35$.

Digitized by Google

Stab (18) wiederholt.

Abscisse	Ordinate	Ordinatendiff.
5	0.20	
		0.30
6	0.50	
		0.40
7	0.90	
		0.60
8	1.50	
		0.70
9	2.20	
		0.85
10	3.05	
		0.90
11	3.95	
		0.95
12	4.90	
		0.95
13	5.85	
		0.90
14	6.75	
		0.95
15	7.70	
		0.95

Abscisse	Ordinate	Ordinatendiff.
		0.95
16	8.65	
		0.90
17	9.55	
		0.95
18	10.50	
		0.95
19	11.45	
		0.90
20	12.35	
		0.85
21	13.20	
		0.80
22	14.00	
		0.90
23	14.90	
		0.80
24	15.70	
		0.80
25	16.50	

In der Reihe der Ordinatendifferenzen sind 6 gleiche Maxima 0.95 vorhanden. Zwar folgen dieselben nicht aufeinander, aber die Zwischenglieder unterscheiden sich nur um $^1/_{20}$ mm von ihnen. Unter der Voraussetzung eines regelmässigen Curvenverlaufs darf aus diesem Umstande nicht einmal auf einen Messungsfehler geschlossen werden; vielmehr darauf, dass der maximale Werth der Ordinatendifferenzen zwischen 0.90 und 0.95 gelegen sei. Daraus erklären sich die Schwankungen in der Grösse der Differenzen. Betrachtet man jedoch die fünf letzten derselben, so bemerkt man, dass ein Messungsfehler der Ordinatenbestimmung vorhanden ist: die viertletzte Differenz 0.80 hätte um $^1/_{20}$ mm höher, die drittletzte um ebensoviel niedriger gefunden werden müssen.

Als Wendepunktsabscisse hat man zu nehmen $T = \frac{10 + 20}{2} = 15$, welchem Werthe von T die Ordinate $S = 7.70$ zukommt.

Stab (24).

Abscisse	Ordinate	Ordinatendiff.
10	1.20	
		0.55
11	1.75	
		0.55
12	2.30	
		0.65
13	2.95	
		0.70
14	3.65	
		0.70
15	4.35	
		0.70
16	5.05	
		0.75
17	5.80	
		0.75
18	6.55	
		0.80
19	7.35	
		0.70
20	8.05	
		0.75

Abscisse	Ordinate	Ordinatendiff.
		0.75
21	8.80	
		0.70
22	9.50	
		0.75
23	10.25	
		0.60
24	10.85	
		0.70
25	11.55	
		0.75
26	12.30	
		0.70
27	13.00	
		0.65
28	13.65	
		0.65
29	14.30	
		0.65
30	14.95	

Digitized by Google

Nur eine einzige maximale Ordinatendifferenz 0.80 ist vorhanden. Vor derselben aber befinden sich zwei einander gleiche, nur um $^1/_{20}$ mm von ihr sich unterscheidende; auf die Maximaldifferenz aber folgt unmittelbar das Glied 0.70, welches seinerseits wieder dem Gliede von der Grösse 0.75 unmittelbar vorangeht. Es liegt also sicher ein Messungsfehler vor: die höchste Differenz 0.80 ist um $^1/_{20}$ mm zu gross, die ihr unmittelbar folgende um ebensoviel zu klein gefunden worden. Nach erfolgter Fehlercorrectur hat man also als wahre Maximaldifferenz 0.75 zu nehmen, welche dann fünfmal auftreten würde, ohne von niedrigeren Differenzen unterbrochen zu werden. Später tritt die höchste Differenz 0.75 allerdings noch zweimal auf, aber das erste Mal folgt ihr unmittelbar der um nicht weniger als 0.15 mm kleinere Werth 0.60; und auch die noch später kommende Maximaldifferenz ist von kleineren Werthen umgeben, sodass man hier wieder einen Messungsfehler vorauszusetzen hat. Bei der Bestimmung des Wendepunkts kommen also nur die fünf aufeinander folgenden Differenzen in Betracht und man erhält somit für die Wendepunktsabscisse den Werth $T = \frac{16 + 21}{2} = 18.5$, welcher als Ordinate der Werth 6.95 entspricht.

Stab (32).

Abscisse	Ordinate	Ordinatendiff.
10	0.90	
		0.30
11	1.20	
		0.35
12	1.55	
		0.35
13	1.90	
		0.45
14	2.35	
		0.50
15	2.85	
		0.50
16	3.35	
		0.55
17	3.90	
		0.55
18	4.45	
		0.55
19	5.00	
		0.55
20	5.55	
		0.55
21	6.10	
		0.55
22	6.65	
		0.55
23	7.20	
		0.55
24	7.75	
		0.55
25	8.30	
		0.55

Abscisse	Ordinate	Ordinatendiff.
		0.55
26	8.85	
		0.50
27	9.35	
		0.50
28	9.85	
		0.50
29	10.35	
		0.50
30	10.85	
		0.50
31	11.35	
		0.50
32	11.85	
		0.45
33	12.30	
		0.50
34	13.80	
		0.55
35	14.35	
		0.50
36	14.85	
		0.50
37	15.35	
		0.50
38	15.85	
		0.50
39	16.35	
		0.45
40	16.80	

Die Maximaldifferenz lautet 0.55. Dieselbe tritt zunächst 10 Mal hintereinander auf, viel später noch einmal. Da aber im letzteren

Digitized by Google

Falle das vorvorhergehende Glied 0.45 beträgt, und die Glieder der Umgebung = 0.50 sind, so ist sicher der Werth 0.45 wegen eines Messungsfehlers um $1/_{20}$ mm zu klein und die zuletzt auftretende Maximaldifferenz 0.55 mm ebensoviel zu gross erhalten worden. Bei Bestimmung des Wendepunkts sind nur die 10 ersten Maximaldifferenzen zu berücksichtigen, und als Inflexionsabscisse findet sich mithin $T = \frac{16 + 26}{2} = 21$, wozu $S = 6.10$ gehört.

Stab (32) wiederholt.

Abscisse	Ordinate	Ordinatendiff.	Abscisse	Ordinate	Ordinatendiff.
10	1.25				0.45
		0.30	26	8.05	
11	1.55				0.50
		0.30	27	8.55	
12	1.85				0.50
		0.30	28	9.05	
13	2.15				0.50
		0.35	29	9.55	
14	2.50				0.45
		0.35	30	10.00	
15	2.85				0.45
		0.40	31	10.45	
16	3.25				0.45
		0.45	32	10.90	
17	3.70				0.45
		0.45	33	11.35	
18	4.15				0.45
		0.45	34	11.80	
19	4.60				0.45
		0.50	35	12.25	
20	5.10				0.45
		0.50	36	12.70	
21	5.60				0.45
		0.50	37	13.15	
22	6.10				0.45
		0.50	38	13.60	
23	6.60				0.45
		0.50	39	14.05	
24	7.10				0.45
		0.50	40	14.50	
25	7.60				
		0.45			

Die Maximaldifferenz 0.50 tritt achtmal auf. Da die Reihe der Maximaldifferenzen nur ein einziges Mal von der blos um $1/_{20}$ mm geringeren Differenz 0.45 unterbrochen wird, so darf angenommen werden, dass das erwähnte Glied 0.45 in Folge eines Messungsfehlers um jenen Betrag zu klein gefunden wurde. Man ist also berechtigt zu der Voraussetzung, dass die Maximaldifferenz 0.50 10 Mal hinter einander auftritt. Man erhält als Wendepunktsabscisse $T = \frac{19 + 29}{2} = 24$, und als Inflexionsordinate $S = 7.10$.

Stab (40).

Abscisse	Ordinate	Ordinatendiff.	Abscisse	Ordinate	Ordinatendiff.
					0.20
15	1.35		18	1.95	
		0.20			0.20
16	1.55		19	2.15	
		0.20			0.25
17	1.75		20	2.40	
		0.20			0.25

Digitized by Google

Abscisse	Ordinate	Ordinatendiff.
		0.25
21	2.65	
		0.30
22	2.95	
		0.30
23	3.25	
		0.30
24	3.50	
		0.25
25	3.75	
		0.30
26	4.05	
		0.25
27	4.30	
		0.25
28	4.55	
		0.25

Abscisse	Ordinate	Ordinatendiff.
		0.25
29	4.80	
		0.25
30	5.05	
		0.25
31	5.30	
		0.30
32	5.60	
		0.30
33	5.90	
		0.25
34	6.15	
		0.25
35	6.40	
		0.20
36	6.60	

In der Reihe der Ordinatendifferenzen treten sechs gleiche Maxima 0.30 auf. Da dieselben aber nicht aufeinander folgen, sondern der nur um $^1/_{20}$ mm kleinere Werth 0.25 mehrfach dazwischen erscheint, so wird man nicht fehl gehen, wenn man das Maximum der Ordinatendifferenz zwischen jene beiden Grössen verlegt. Betrachtet man also die nächstniedrigere Differenz 0.25 als der Differenz 0.30 gleichwerthig, so resultirt für die Wendepunktsabscisse $T = 27.0$, wozu $S = 4.30$ als Ordinate gehört.

Die Zusammenstellung der erhaltenen Resultate ergiebt folgendes:

Trägheitsmoment	Wendepunkt	
	Abscisse	Ordinate
Minimalmoment	6.0	4.70
Stab (12)	8.5	4.65
Stab (18)	12.0	6.80
Stab (18) wdh.	13.5	7.35
Stab (18) wdh.	15.0	7.70
Stab (24)	18.5	6.95
Stab (32)	21.0	6.10
Stab (32) wdh.	24.0	7.10
Stab (40)	27.0	4.30

Wir bemerken also, dass mit wachsendem Trägheitsmoment auch die Zeit, zu welcher der Wendepunkt eintritt, sich immer mehr verlängert, ein Beweis dafür, dass mit der Verlangsamung der Muskelbewegung die Kraftentwickelung im Muskel zwar gleichfalls verzögert, nicht aber hintangehalten wird. Was die Grösse der Wendepunktsordinaten betrifft, der sogenannten »Gleichgewichtshöhen«, so werden wir dieselben später mit der der Hubhöhen vergleichen.

Digitized by Google

5. Interpolationsmethode zur Bestimmung des Wendepunkts.

Aus der Besprechung der vorgelegten Curven ist ersichtlich, dass die Lage des Wendepunktes nur unter bestimmten Bedingungen unmittelbar durch die Messung der Ordinaten gegeben ist, wenn nämlich der Muskel ohne an seiner Zusammenziehung gehindert zu sein das Gewicht hebt. Wenn dagegen der Verkürzung durch die Einführung träger Massen eine Hemmung bereitet wird, so tritt an die Stelle der scharfen Grenze zwischen den Curvenabschnitten mit zu- und abnehmender Geschwindigkeit des Ordinatenwachsthums ein geradliniges Zwischenstück von mehr oder weniger grosser Ausdehnung. Die Umwandlung des plötzlichen in einen allmählichen Uebergang aus der Periode steigender in die sinkender Energie lässt sich in verschiedener Weise deuten; entweder durch Reibungen oder durch andere Anordnung der Muskelkräfte veranlasst.

Da die letztere Annahme unwahrscheinlich ist, weil nicht einzusehen, wie die Art der Kräfteanordnung bei verlangsamter Zuckung gegen die bei der gewöhnlichen verändert sein sollte, da man auch bei Zuckungen, die durch Ermüdung oder durch Erniedrigung der Temperatur verlängert sind, einen Wendepunkt sieht, so ist es höchst wahrscheinlich, dass die Apparatstücke das Auftreten einer Wendestrecke statt eines Wendepunkts veranlasst haben.

Diese Erwägung lässt es fraglich erscheinen, ob man zu dem bisherigen Verfahren berechtigt ist, den Endpunkt der Inflexionsabscisse in die Mitte des durch die gleich grossen maximalen Ordinatendifferenzen auf der Abscissenaxe bestimmten Intervalls zu verlegen. Und in dem Zweifel an der Zulässigkeit dieser Operation wird man noch bestärkt durch die Wahrnehmung, dass die auf die maximalen folgenden Ordinatendifferenzen langsamer abnehmen, als die jenen vorhergehenden wachsen. Dieser Umstand erweckt den Wunsch, noch durch ein anderes Verfahren, durch eine Interpolationsmethode, den Wendepunkt auch in dem Falle zu suchen, wo er in der Curve sich nicht ausdrückt. Bei der Anwendung derselben darf man sich jedoch nicht verhehlen, dass auch das hierbei gewonnene Resultat in den Fällen mit Unsicherheit verknüpft ist, wo die Reihe der Ordinatendifferenzen eine beträchtliche Anzahl gleich grosser Maxima enthält.

Digitized by Google

Nennt man die den Abscissen

$$a,\ a + w,\ a + 2w,\ a + 3w,\ \ldots\ldots,\ a + nw$$

zugehörigen Ordinaten oder Functionswerthe resp.:

$$f(a),\ f(a + w),\ f(a + 2w),\ f(a + 3w),\ \ldots,\ f(a + nw),$$

und setzt die Functionsdifferenzen:

$$\begin{aligned} f(a + w) - f(a) &= f'(a + \tfrac{1}{2}),\\ f(a + 2w) - f(a + w) &= f'(a + \tfrac{3}{2}),\\ f(a + 3w) - f(a + 2w) &= f'(a + \tfrac{5}{2}),\\ &\ldots\ldots \end{aligned}$$

ferner:

$$\begin{aligned} f'(a + \tfrac{3}{2}) - f'(a + \tfrac{1}{2}) &= f''(a + 1),\\ f'(a + \tfrac{5}{2}) - f'(a + \tfrac{3}{2}) &= f''(a + 2),\\ &\ldots\ldots \end{aligned}$$

und:

$$\begin{aligned} f''(a + 2) - f''(a + 1) &= f'''(a + \tfrac{3}{2}),\\ &\ldots\ldots \end{aligned}$$

indem man sich damit der von Encke[1]) in die Interpolationsrechnung eingeführten Bezeichnungsweise anschliesst, so erhält man folgendes Schema der Abscissen oder Argumente und der ihnen zugehörigen Ordinaten oder Functionswerthe, sowie deren Differenzen:

Argument:	Function:	I. Diff.:	II. Diff.:	III. Diff.:
a	$f(a)$			
		$f'(a + \tfrac{1}{2})$		
$a + w$	$f(a + w)$		$f''(a + 1)$	
		$f'(a + \tfrac{3}{2})$		$f'''(a + \tfrac{3}{2})$
$a + 2w$	$f(a + 2w)$		$f''(a + 2)$	
		$f'(a + \tfrac{5}{2})$		
$a + 3w$	$f(a + 3w)$			

Will man nun mit Hilfe der Curvenpunkte, deren Coordinaten gemessen wurden, die Coordinaten des gesuchten Wendepunktes berechnen, so braucht man zu dieser Berechnung mindestens vier Punkte der Curve. Der unbekannte Factor n, um dessen Bestimmung es sich hier zur Berechnung der Inflexionsabscisse handelt, tritt in diesem einfachsten Falle der Wendepunktbestimmung als Wurzel einer linearen Gleichung auf. Wie in Anhang III. auseinandergesetzt wird, erhält man nämlich für n den Ausdruck:

$$n = 1 - \frac{f''(a + 1)}{f'''(a + \tfrac{3}{2})}\,.$$

1) Vgl. in Brünnow, Sphärische Astronomie, den Abschnitt über Interpolationsrechnung.

Digitized by Google

Anwendung auf die Muskelcurve.

Um die jetzt zu erhaltenden Resultate mit denen des vorhin befolgten Verfahrens vergleichen zu können, lege ich bei der jetzigen Methode dieselben Curven zu Grunde, wie bei der früheren.

Versuch V.

Minimalmoment.

Es wurden die folgenden Abscissen und die ihnen zugehörigen Ordinaten gemessen:

Abscisse:	Ordinate:
2 mm	0.15 mm
3	0.85
4	2.05
5	3.35
6	4.70
7	6.05
8	7.35
9	8.60
10	9.70

Wir wollen nun zur Wendespunktsbestimmung die folgenden vier Punkte benutzen, deren Abscissen

2, 4, 6, 8 mm

um gleiche Stücke differiren, wie es die Methode verlangt. Dann ist also nach den obigen Auseinandersetzungen $a = 2$, ferner das constante Intervall w ebenfalls $= 2$, und wir haben das folgende Schema zusammengehöriger Argumente und Functionenwerthe, sowie der ersten, zweiten und dritten Differenzen der letzteren:

$$\begin{array}{llllll}
a = 2 & f(a) = 0.15 & & & & \\
 & & f'(a+{}^1/_2) = 1.90 & & & \\
a+w = 4 & f(a+w) = 2.05 & & f''(a+1) = 0.75 & & \\
 & & f'(a+{}^3/_2) = 2.65 & & f'''(a+{}^3/_2) = -0.75 & \\
a+2w = 6 & f(a+2w) = 4.70 & & f''(a+2) = 0.00 & & \\
 & & f'(a+{}^5/_2) = 2.65 & & & \\
a+3w = 8 & f(a+3w) = 7.35 & & & &
\end{array}$$

Also ergiebt sich:

$$\begin{aligned} n &= 1 - \frac{f''(a+1)}{f'''(a+{}^3/_2)}, \\ &= 1 - \frac{0.75}{-0.75}, \\ &= 2, \end{aligned}$$

Digitized by Google

und dadurch gewinnt man die gesuchte Inflexionsabscisse:

$$a + nw = 6.$$

Dazu gehört als Inflexionsordinate:

$$f(a + nw) = f(6) = 4.70.$$

Nun ist wie bei jeder Näherungsmethode so auch bei der hier auseinandergesetzten Willkür in der Bestimmung des Wendepunkts insofern nicht ganz auszuschliessen, als man für die Coordinaten des letzteren andere Werthe erhalten wird, wenn man der Bestimmung andere vier Punkte zu Grunde legt. Grosse Unterschiede aber zeigen sich nicht. Um dies zu beweisen, wählen wir jetzt zur Bestimmung des Wendepunkts die folgenden vier Punkte mit den nach Vorschrift um gleiche Stücke sich unterscheidenden Abscissen:

3, 5, 7, 9.

Es ist also jetzt: $a = 3$, und w wie vorhin $= 2$. Das dem vorigen entsprechende Schema lautet hier:

3	0.85			
		2.50		
5	3.35		0.20	
		2.70		— 0.35
7	6.05		— 0.15	
		2.55		
9	8.60			

Also ist

$$f''(a + \tfrac{1}{2}) = 0.20,\quad f'''(a + \tfrac{3}{2}) = -0.35,$$

und

$$n = 1 - \frac{f''(a + \frac{1}{2})}{f'''(a + \frac{3}{2})} = 1 - \frac{0.20}{-0.35} = 1\tfrac{4}{7};$$

mithin erhalten wir jetzt für die Inflexionsabscisse:

$$a + nw = 6\tfrac{1}{7},$$

während sich vorher für die Abscisse des Wendepunkts der Werth 6 ergab. Beide Werthe stimmen also nahe mit einander überein.

Wenn wir endlich zur Wendepunktsbestimmung die Abscissen der folgenden vier Punkte benutzen:

4, 6, 8, 10,

so ist das bei der Berechnung aufzustellende Schema das folgende:

4	2.05			
		2.65		
6	4.70		0.00	
		2.65		— 0.30
8	7.35		— 0.30	
		2.35		
10	9.70			

Digitized by Google

Also

$$f''(a+1) = 0.00,\ f'''(a+{}^3\!/_2) = -0.30,$$

$$n = 1 - \frac{f''(a+1)}{f'''(a+{}^3\!/_2)} = 1,$$

$$a + nw = 6.$$

Es resultirt also für die Abscisse des Wendepunkts genau derselbe Werth wie bei der ersten Bestimmung.

Stab (12).

Benutzt man die Punkte mit den Abscissen

3, 7, 11, 15

zur Berechnung der Wendepunktsabscisse, so erhält man dafür den Werth 10.2, wozu als Ordinate 6.75 gehört.

Wählt man aber die Punkte mit den Abscissen 4, 7, 10, 13, so erhält man als Inflexionsabscisse $T = 9.5$, und dazu $S = 5.9$. Legt man endlich die Punkte mit den Abscissen 5, 8, 11, 14 der Bestimmung zu Grunde, so gewinnt man $T = 9.9$, $S = 6.40$.

Stab (18).

Bei Wahl der Abscissen 5, 10, 15, 20 resultirt:

$$T = 13.9,\ S = 8.9.$$

Benutzt man jedoch die Abscissen 6, 10, 14. 18, so erhält man:

$$T = 13.6, \quad S = 8.55.$$

Nimmt man schliesslich die Abscissen 7, 11, 15, 19, so resultirt:

$$T = 13.4, \quad S = 8.35.$$

Stab (18) wdh.

Wendet man der Reihe nach dieselben vier Abscissen an, so hat man im ersten Falle:

$$T = 14.3, \quad S = 8.15,$$

im zweiten:

$$T = 14.0, \quad S = 7.85,$$

und im dritten:

$$T = 14.0, \quad S = 7.85.$$

Stab (18) wdh.

Durch Herbeiziehung derselben drei Abscissencombinationen erhält man resp.:

Digitized by Google

$$T = 15.0, \quad S = 7.70,$$
$$T = 14.2, \quad S = 6.90,$$
$$T = 15.0, \quad S = 7.70.$$

Stab (24).

Je nachdem man die Abscissen

10, 16, 22, 28,
11, 17, 23, 29,
12, 18, 24, 30

der Bestimmung zu Grunde legt, resultirt:

$$T = 20.0, \quad S = 8.05,$$
$$T = 19.2, \quad S = 7.40,$$
$$T = 20.0, \quad S = 8.05.$$

Stab (32).

Wählt man die Abscissen:

13, 22, 31, 40,

so folgt:

$$T = 22.6, \quad S = 6.95;$$

wählt man:

14, 22, 30, 38,

so ergiebt sich:

$$T = 22.8, \quad S = 7.10;$$

benutzt man jedoch die Abscissen:

15, 23, 31, 39,

so wird erhalten:

$$T = 25.6, \quad S = 8.60,$$

und wenn man

16, 24, 32, 40

nimmt:

$$T = 26.8, \quad S = 9.75.$$

Stab (32) wdh.

Bei Zugrundelegung der Abscissen:

11, 20, 29, 38

resultirt:

$$T = 26.3, \quad S = 8.20;$$

benutzt man die Abscissen:

Digitized by Google

10, 20, 30, 40,

so folgt:

$T = 27.0, \quad S = 8.55,$

und nimmt man die Abscissen:

10, 19, 28, 37,

$T = 25.8, \quad S = 7.95;$

wählt man endlich:

12, 21, 30, 39:

$T = 26.9, \quad S = 8.50.$

Stab (40).

Für die Abscissen:

15, 22, 29, 36

erhält man:

$T = 27.8, \quad S = 4.50.$

Die mit den beiden Methoden erhaltenen Resultate sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt. Die Glieder der beiden letzten Reihen sind Mittelzahlen aus den mit Hilfe der Interpolationsmethode erhaltenen Werthen.

Trägheitsmoment	Methode der grössten Ordinatendifferenzen		Interpolationsmethode	
	Inflexions-abscisse	Inflexions-ordinate	Inflexions-abscisse	Inflexions-ordinate
Minimalmoment	6.0	4.70	6.0	4.70
Stab (12)	8.5	4.65	9.9	6.40
- (18)	12.0	6.80	13.6	8.55
- (18) wdh.	13.5	7.35	14.1	7.95
- (18) wdh.	15.0	7.70	14.9	7.60
- (24)	18.5	6.95	19.7	7.85
- (32)	21.0	6.10	24.5	8.10
- (32) wdh.	24.0	7.10	26.5	8.20
- (40)	27.0	4.30	27.8	4.50

Mit Ausnahme eines einzigen Falles (Stab (18) wdh.), wo die mit der Methode der grössten Ordinatendifferenzen erhaltenen Werthe der Inflexionscoordinaten die entsprechenden Coordinaten bei Anwendung der Interpolationsmethode um je 0.1 mm übertreffen, sind die bei Benutzung der letzteren Methode sich ergebenden Zahlenwerthe

Digitized by Google

grösser als die mit Hilfe der Methode der maximalen Ordinatendifferenzen resultirenden.

Gerade dieser Umstand aber beweist, dass den mit Hilfe der Interpolationsrechnung erhaltenen Resultaten das grössere Gewicht beizulegen ist, denn mit demselben steht die schon oben erwähnte Beobachtung durchaus im Einklange, dass die auf die maximalen Ordinatendifferenzen folgenden Glieder langsamer abnehmen, als die den maximalen Differenzen vorhergehenden wachsen, und da die früher angewandte Methode jene Thatsache nicht in Rechnung zieht, können vermittelst derselben die Coordinaten des Wendepunkts stets nur zu klein gefunden werden. Handelt es sich jedoch nur darum, Lagebeziehungen des Wendepunkts gegen den Anfangspunkt oder den Gipfelpunkt der Muskelcurve nachzuweisen, so ist das früher befolgte Verfahren ausreichend.

Meine Bemühungen, die Methoden der Interpolationsrechnung auch auf die Bestimmung des zwischen Anfangspunkt der Bewegung und Wendepunkt gelegenen Verschwindungspunktes des dritten Differentialquotienten auszudehnen, für welchen Punkt die Muskelkraft ihr Maximum erreicht, haben keinen Erfolg gehabt. Wenn auch der theoretischen Lösung dieser Aufgabe keine Hindernisse im Wege stehen, so stellen sich doch der Anwendung der Methode auf die Muskelcurve erhebliche nicht vorausgesehene und nicht vorauszusehende Schwierigkeiten entgegen. Einige Versuche, die ich zur Bestimmung jener Stelle der Muskelcurve angestellt habe, führten zu keinem unzweideutigen Resultat: es scheint nämlich, als ob der fragliche Punkt in grosser Nähe des Anfangspunktes der Bewegung des Systems, wo die Curve von der Abscissenaxe sich löst, gelegen sei. Dieser Umstand aber ist für die Anwendung der Methode höchst ungünstig, da man darnach trachten muss, die fünf Punkte, die man zur Bestimmung des dritten Differentialquotienten mindestens braucht, auf der Curve so zu wählen, dass sie den gesuchten Punkt einschliessen. Die Aufsuchung des Verschwindungspunktes des dritten Differentialquotienten muss daher vorläufig unterbleiben.

Digitized by Google

6. Arbeit und Wärme bei constanter Anfangsspannung und variabelem Trägheitsmoment.

Um die Erscheinungen der Ermüdung, welche bei den Versuchen der vorliegenden Art ebenso wie bei denen mit constantem Trägheitsmoment und variabeler Anfangsspannung eine grosse Rolle spielen, möglichst auszuschliessen, liess ich die einzelnen den Muskel treffenden Reize in Pausen von durchschnittlich 2 Minuten aufeinander folgen. Der nothwendige Ausgleich der grossen Temperaturdifferenz zwischen den Enden des Thermoelements, die unmittelbar nach Einhängung des Muskels in die feuchte Kammer zu beobachten ist, vollzog sich bei den während des Sommers angestellten Experimenten in der Regel in 15—20 Minuten; nur in einigen wenigen Fällen musste etwa ½ Stunde gewartet werden. Im Winter jedoch beanspruchte die Ausgleichung der Temperaturen der Säulenenden mindestens ½ Stunde, ja manchmal ¾—1 Stunde.

Die Versuche begann ich mit dem Minimalmoment und steigerte dann das Trägheitsmoment so lange, bis der bei Anwendung des kleinsten Moments resultirende Hub wieder erreicht worden war.

Alsdann machte ich eine zweite Reihe von Versuchen mit absteigenden Trägheitsmomenten, sodass ich also mit dem grössten Moment die Versuchsreihe begann und mit dem kleinsten abschloss. Wenn ich aber auch bei Anwendung des maximalen Trägheitsmoments im Stande war, die Muskelarbeit beträchtlich zu verringern, so habe ich doch in keinem einzigen Falle beobachtet, dass der frische, unermüdete Muskel selbst bei Anwendung des erwähnten enormen Maximalmoments und der stärksten Anfangsspannung von 165.85 g nicht befähigt gewesen wäre, das System zu drehen und einen wenn auch nur geringen Hub zu erzeugen.

In der folgenden Tabelle finden sich die bei aufsteigender Reihe der Trägheitsmomente resultirenden Werthe der Coordinaten der Curvenmaxima, sowie die Grössen der zugehörigen Nadelausschläge zusammengestellt.

Digitized by Google

Versuch V.

Trägheitsmoment	Maximum Abscisse	Maximum Ordinate	Nadelausschlag	
Minimalmoment	16.0	12.50	8.0	
Stab (12)	38.6	23.05	9.5	
Stab (18)	72.0	29.40	11.0	
	72.5	29.00	Faden	von der Rolle geschleudert. Abkühlung anzeigender Ausschlag.
	74.0	26.35	10.5	
Stab (24)	120.0	45.00	12.5	
Stab (32)	172.5	46.20	11.5	
	178.0	46.45	11.0	
Stab (40)	212.5	28.25	9.5	
Stab (48)	220.0	21.65	9.0	
Stab (60)		13.90	8.5	

Vergleichen wir nun zunächst die Reihe der Maximalabscissen mit der der Trägheitsmomente, so bemerken wir, dass die Zeit, zu welcher das Curvenmaximum eintritt, mit wachsendem Trägheitsmomente gleichfalls in beständigem Wachsthum begriffen ist. Dies ist eben nichts als der Ausdruck der physikalisch selbstverständlichen Thatsache, dass mit der beständigen Vermehrung der trägen, in Bewegung zu versetzenden Massen die immer grösser werdende Verzögerung der vom Muskel ausgelösten Bewegung Hand in Hand geht.

Was aber nun die Reihen der Maximalhübe und der ihnen zugehörigen Nadelausschläge betrifft, so zeigt sich zwischen beiden ein gewisser Parallelismus insofern, als einer Vergrösserung der vom Muskel geleisteten Arbeit auch eine Vermehrung der von ihm producirten Wärmemenge entspricht. Wir sehen, dass mit wachsendem Trägheitsmoment Muskelarbeit sowohl als Muskelwärme anfänglich gleichfalls wachsen, um nach Erreichung eines Maximums wieder abzunehmen. Ja, jener Parallelismus geht so weit, dass gleichen Arbeitsgrössen diesseits, resp. jenseits des Arbeitsmaximums wenigstens ungefähr gleiche Wärmemengen diesseits, resp. jenseits des Wärmemaximums entsprechen. Namentlich gilt dies für die bei Anwendung des kleinsten und des grössten Trägheitsmoments gewonnenen Werthe von Arbeit und Wärme. Ein vollkommener Parallelismus freilich liegt nicht vor, denn dazu wäre es nothwendig, dass

Digitized by Google

Arbeitsmaximum und Wärmemaximum zusammenfielen. Dies ist jedoch keineswegs der Fall, sondern letzteres kommt früher als ersteres.

Alle die geschilderten Verhältnisse kehren bei sämmtlichen Experimenten übereinstimmend wieder, sobald man den Versuch mit dem frischen, unermüdeten Muskel beginnt. Liess ich nun aber einer Versuchsreihe mit aufsteigenden Trägheitsmomenten eine solche mit absteigenden folgen, so ergab sich trotz grösster Sorgfalt in der Anstellung der Versuche kein unzweideutiges Resultat. Zwei Fälle sind auseinanderzuhalten:

1) Häufig ereignete es sich, dass sowohl die Reihe der Maximalordinaten als auch die der Nadelausschläge Maxima erreichten, derart, dass das Wärmemaximum früher eintrat als das Arbeitsmaximum. Uebrigens kam es nicht selten vor, dass Arbeitsmaximum und Wärmemaximum zusammenfielen, welche Beobachtung auch mehrfach in der Reihe der aufsteigenden Trägheitsmomente gemacht wurde.

2) Die Reihe der Maximalhübe erreichte zwar ein Maximum, nicht aber die der Nadelausschläge, sondern die letzteren nahmen beständig ab.

Nun weiss man schon aus den Heidenhain'schen Versuchen, dass der Muskel für die Wärmeentwickelung schneller ermüdet, als für die Arbeitsleistung; jener Umstand wäre also dadurch zu erklären, dass man sagt, der Muskel habe sich in einem Stadium weit fortgeschrittener Ermüdung befunden.

Um zu sehen, ob am frischen Muskel ein constantes Resultat sich herausstelle, habe ich eine Gruppe von Versuchen mit der Reihe der absteigenden Trägheitsmomente begonnen und dabei gefunden, dass niemals das Wärmemaximum hinter das Arbeitsmaximum fällt. Beide können gleichzeitig eintreten, doch ereignet es sich weit häufiger, dass das Maximum der Wärme dem der Arbeit vorausgeht. Als Belege theile ich folgende Versuche mit:

Versuch XXXIX.

Anfangsspannung 66.42 g.

Trägheitsmoment	Maximum	Nadelausschlag
Stab (60)	22.10	12.5
- (48)	31.05	14.0
- (36)	31.70	14.0

Digitized by Google

Trägheitsmoment	Maximum	Nadelausschlag
Stab (28)	26.05	12.0
- (28) wdh.	25.55	12.0
- (24)	20.85	10.5
- (18)	15.15	10.0
Minimalmoment	10.25	8.5

Dieser Versuch liefert zugleich ein Beispiel für den Fall, in welchem das Arbeitsmaximum mit dem Wärmemaximum zusammenfällt; derselbe lehrt aber noch, dass das grösste Moment, mit welchem das Experiment begonnen wurde, doch noch nicht gross genug war, um den Hub des unermüdeten Muskels auf die Grösse des bei Anwendung des Minimalmoments erzielten herabzudrücken. Darum will ich ein zweites Beispiel anführen, bei welchem die Reihe der absteigenden Trägheitsmomente mit dem grössten überhaupt benutzten Momente begann. Voran gehen zwar einige Versuche mit dem Minimalmoment, um die bei unmittelbar aufeinander folgender Anwendung der beiden extremen Momente gewonnenen Arbeits- und Wärmequantitäten vergleichen zu können: aber jene wenigen Versuche mit dem Minimalmoment ermüden den Muskel nicht merklich; umsomehr freilich die mit grossem Trägheitsmoment, wie sich bei Betrachtung der Versuchsresultate sofort zeigen wird.

Versuch LXI.

Trägheitsmoment	Maximum	Nadelausschlag
Minimalmoment	15.20	16.5
- wdh.	13.60	16.5
- -	13.30	16.5
Maximalmoment	3.30	24.0
- wdh.	3.45	23.5
- -	3.90	22.5
Stab (122)	14.05	22.0
- wdh.	13.80	20.0
- -	13.20	21.0
Stab (100)	18.00	20.5
- wdh.	18.20	20.0
Stab (80)	37.25	19.5
Stab (60)	45.95	19.0

Digitized by Google

Trägheitsmoment	Maximum	Nadelausschlag
Stab (48)	40.50	18.5
- (40)	36.25	17.5
- (36)	26.10	17.0
- (32)	25.75	17.0
- (28)	23.05	16.5
- (24)	20.95	16.0
Stab (18)	15.65	14.0
Minimalmoment	10.75	11.5

Zunächst ist zu bemerken, dass sich die sehr beträchtlichen Unterschiede der Nadelausschläge zwischen diesem und dem früher betrachteten Versuch V vor Allem durch die Verschiedenheit der Anfangsspannung erklären, welche bei dem vorliegenden Versuch 66.42 g beträgt und diejenige Anfangsspannung darstellt, welche unter sonst gleichen Umständen in der Regel die grössten Nadelausschläge ergiebt. Ferner sehen wir sehr deutlich, wie ausserordentlich der Einfluss der Ermüdung bei dem jetzigen Versuche sich geltend gemacht hat. Denn die Nadelausschläge erreichen überhaupt kein Maximum, sondern nehmen von Anfang an beständig ab; und dieser Umstand kann nur dadurch erklärt werden, dass die Versuche mit grossen Trägheitsmomenten die Wärmeproduction des Muskels besonders stark ermüden. Bezüglich der für das Trägheitsmoment Stab (122) erhaltenen Nadelausschläge ist darauf aufmerksam zu machen, dass man hätte erwarten sollen, der Nadelausschlag 21.0 wäre dem Ausschlag 20.0 vorangegangen. Solche und ähnliche Unregelmässigkeiten in der Ablenkung der Nadel kamen nicht selten vor, ohne dass es möglich gewesen wäre, irgend welchen Grund dafür anzugeben, irgend welche Störung nachweisbar zu machen. Ich glaube aber, dass dieser Umstand bei Abstufungsversuchen der vorliegenden Art wohl kaum befremden darf.

Der Versuch zeigt noch, dass sich die bei unmittelbar aufeinander folgender Anwendung des minimalen und des maximalen Trägheitsmoments erzeugten Wärmemengen ungefähr verhalten wie 2 : 3, während sich die zugehörigen Arbeitsgrössen verhalten etwa wie 4 : 1.

Jedenfalls steht fest, dass das Wärmemaximum, gleichgiltig ob man am frischen, unermüdeten Muskel den Versuch mit der auf-

Digitized by Google

oder mit der absteigenden Reihe der Trägheitsmomente beginnt, nie später kommt als das Maximum der Arbeit.

Erwägt man, dass in mehreren Fällen das gleichzeitige Eintreten von Wärme- und Arbeitsmaximum beobachtet wurde, sowie, dass häufig ein Wärmemaximum überhaupt fehlt, sobald man den Versuch mit sehr grossem die Wärmeermüdung des Muskels stark befördernden Trägheitsmoment beginnt, so wird man nicht fehl gehen, wenn man den Satz ausspricht, dass der gleichzeitige Eintritt von Arbeits- und Wärmemaximum eine Erscheinung ist, deren regelmässiges Eintreten nur durch die Gesetze der Muskelermüdung getrübt wird.

Was ferner die Lage des Wendepunkts im Vergleich zu der des Curvengipfels betrifft, so giebt uns folgende Tabelle darüber Aufschluss, welche sich auf den schon früher behandelten Versuch V bezieht. Die Wendepunktscoordinaten sind Mittelzahlen aus den mit Hilfe der Interpolationsmethode erhaltenen Werthen.

Trägheitsmoment	Wendepunkt		Gipfelpunkt	
	Abscisse	Ordinate	Abscisse	Ordinate
Minimalmoment	6.0	4.70	16.0	12.50
Stab (12)	9.9	6.40	38.5	23.05
- (18)	13.6	8.55	72.0	29.40
- (18)	14.1	7.95	72.5	29.00
- (18)	14.9	7.60	74.0	26.35
- (24)	19.7	7.85	120.0	45.00
- (32)	24.5	8.40	172.5	46.20
- (32)	26.5	8.30	178.0	46.45
- (40)	27.8	4.50	212.5	28.25

Wir bemerken mithin — und auch dieses ist ein Resultat, welches in sämmtlichen Versuchen wiederkehrt — dass die Wendepunktscoordinaten sich zum Trägheitsmoment ebenso verhalten wie die des Curvenmaximums: die Zeiten, zu welchen der Wendepunkt eintritt, werden ebenso wie die des Curvenmaximums mit wachsendem Trägheitsmoment immer grösser; die Wendepunktsordinaten dagegen, die Gleichgewichtshöhen, erreichen ebenso wie die Maximalhübe ein Maximum; jedoch sind die Unterschiede der Gleichgewichtshöhen relativ weniger beträchtlich, als die der

Digitized by Google

Maximalordinaten, auch scheint das Maximum der Gleichgewichtshöhe im Allgemeinen wenigstens mit dem der Arbeit gleichzeitig einzutreten. Genaueres lässt sich hierüber nicht sagen; insbesondere sind auch zahlreiche Bemühungen meinerseits, dahin zielend, die Lage des Wendepunkts zu der des Curvenanfangs und des Curvengipfels in eine einfache Beziehung zu setzen, erfolglos geblieben. Das Einzige, was beständig wiederkehrt, ist, dass der Wendepunkt mit wachsendem Trägheitsmoment immer weiter hinausrückt, und dass die Gleichgewichtshöhe ebenso wie die Arbeit (und wahrscheinlich gleichzeitig mit dieser) ein Maximum erreicht.

Aus den Zahlen geht noch hervor, dass die Abscissen des Wendepunktes nicht proportional mit den Trägheitsmomenten wachsen, sondern dass die Unterschiede der Abscissen für gleiche Unterschiede der Trägheitsmomente fortwährend abnehmen. Hieraus folgt, dass der Einfluss des Trägheitsmoments für die Zuckungsdauer ein nur beschränkter ist. Ob eine allgemein giltige Beziehung zwischen dem Wachsthum der Trägheitsmomente und dem der Abscissen des Wendepunkts besteht, wird sich ergeben, wenn ich im Stande sein werde, den ersten Theil der Muskelcurve darzustellen.

Untersuchen wir jetzt die Abhängigkeit der Arbeit und der Wärme vom Trägheitsmoment. Wir thun dies an der Hand der beigegebenen Tafeln VII, VIII und IX. In jeder Figur sind als Abscissen die Maasszahlen der Trägheitsmomente aufgetragen, während die Ordinaten der ausgezogenen Curven die zugehörigen Maximalhübe in ihrer wahren Grösse bedeuten und die Ordinaten der punktirten Curven die wahre Grösse der Nadelausschläge darstellen. Als Einheit des Trägheitsmoments dient das Minimalmoment, welchem auf der Abscissenaxe eine Länge von 1 mm entspricht. In den vier letzten Figuren der Tafel IX entspricht jedem halben Millimeter Abscissenlänge die Einheit des Trägheitsmoments von 668.34 gcm^2. Die Wahl einer so kleinen Längeneinheit erwies sich wegen der bedeutenden Grösse der angewandten, resp. anzuwendenden Trägheitsmomente als nothwendig.

Alle Curven, die »Arbeitscurven« ebensowohl als die »Wärmecurven«, haben die gemeinschaftliche Eigenschaft, mit einem gegen die Abscissenaxe concaven Theile aufzusteigen. Im absteigenden Theil haben sämmtliche Curven einen Wendepunkt. Vor demselben

Digitized by Google

liegt ein gegen die Axe der Abscissen gleichfalls concaves Stück, an welches sich ein convexes schliesst. Das Auftreten eines Wendepunkts erklärt sich durch die ausserordentlich langsame Abnahme der Arbeit wie der Wärme bei wachsendem Trägheitsmoment.

Was zunächst die Muskelarbeit betrifft, so erreicht dieselbe für ein sehr grosses, wenn auch noch immer endliches Trägheitsmoment den Werth Null. Wie aber ist es mit der vom Muskel producirten Wärme? Giebt es auch für diese ein Trägheitsmoment, für welches der Muskel bei der Zuckung keine Wärme erzeugt? Mit anderen Worten: nähert sich die Wärmecurve ebenso wie die Arbeitscurve der Abscissenaxe asymptotisch? Zur Beantwortung dieser Frage ist es von Interesse zu bemerken, dass man den Fall, in welchem der Muskel mit unendlich grossem Trägheitsmoment behaftet ist, realisiren kann. Wenn man nämlich den Muskel bei der Reizung an der Verkürzung dadurch hindert, dass man seine beiden Enden fixirt, so ist dies dasselbe, als wenn man an der Drehaxe ein unendlich grosses Trägheitsmoment angebracht hätte. Wenn auch in solchem Falle der Muskel Arbeit zu leisten nicht im Stande ist, so producirt er doch bekanntlich noch Wärme, deren Betrag sich aber wohl von der bei isometrischer Zuckung, wo dem Muskel eine minimale Bewegung gestattet ist, resultirenden Wärmemenge kaum unterscheiden wird. Die Wärmecurve wird sich mithin im Gegensatz zur Arbeitscurve der Abscissenaxe selbst keineswegs asymptotisch nähern, wohl aber einer Parallelen zu dieser Axe, deren Abstand gleich dem in mm gemessenen Nadelausschlage ist, welchen man bei verhinderter Verkürzung des Muskels erhält.

Anders für den zweiten extremen Werth des Trägheitsmoments, nämlich für das Trägheitsmoment Null. Auch dieser Fall kann realisirt werden: wenn nämlich das Gewicht, mit welchem der Muskel belastet ist, an dem letzteren frei hängt, nicht um eine drehbare Axe geschlungen ist. Der unter solchen Umständen zuckende Muskel aber leistet Arbeit und producirt Wärme, woraus sich ergiebt, dass sowohl die Arbeitscurve als die Wärmecurve nicht durch den Anfangspunkt der Coordinaten, für welchen das Trägheitsmoment verschwindet, hindurchgehen.

Die Betrachtung der Tafeln lehrt noch, dass Arbeitscurve sowohl als Wärmecurve um so steiler ansteigen, je geringer die Anfangsspannung ist, sowie dass bei aufsteigender Reihe der Trägheits-

Digitized by Google

momente die Maxima der Arbeit und der Wärme relativ geringen Werthen des Trägheitsmoments zugehörig sind. Auch zeigen die Ordinaten der Wärmecurve relativ viel geringere Unterschiede, als die der Arbeitscurve.

Die letztere verflacht sich immer mehr und ihre Ordinaten werden gleichzeitig immer kleiner, je grösser man die Anfangsspannung wählt. Aus der bei wachsender Anfangsspannung eintretenden Abnahme der Curvenordinaten, der Hubhöhen, darf jedoch eine parallel gehende Verringerung der Zuckungsarbeit nicht erschlossen werden, insofern als die Maximal**arbeit** zum Unterschied von der Maximal**hubhöhe** bei wachsender Anfangsspannung anfänglich ebenfalls wachsen wird, um erst nach Erreichung eines Maximums abzunehmen.

Wenden wir uns schliesslich zur Frage der Aenderung der Verkürzungsgeschwindigkeit des Muskels mit dem Trägheitsmoment. Wir wollen sowohl die im Wendepunkte eintretende maximale Geschwindigkeit des Muskels, als auch die mittlere Geschwindigkeit desselben auf der Strecke vom Anfangspunkt der Bewegung bis zum Wendepunkt, welcher Curventheil sicher der Muskelcurve im engeren Sinne angehört, als Functionen des Trägheitsmoments darstellen. Da bekanntlich ganz allgemein die Geschwindigkeit der Bewegung gemessen wird durch die trigonometrische Tangente des Neigungswinkels der geometrischen Tangente gegen die Abscissenaxe, so erhalten wir für jene maximale Geschwindigkeit des Muskels ein angenähertes Maass in der maximalen Ordinatendifferenz, welche schon bei der Bestimmung des Wendepunkts eine Rolle spielte. Wollen wir also die Verkürzungsgeschwindigkeiten des Muskels für verschiedene Curven mit einander vergleichen, so finden wir das Verhältniss der Maximalgeschwindigkeiten gleich dem Verhältniss der maximalen Ordinatendifferenzen, vorausgesetzt nur, dass die Abscissendifferenz für beide Curven dieselbe ist, und diese Bedingung war erfüllt.

Ebenso erhalten wir für die mittlere Verkürzungsgeschwindigkeit vom Beginne der Bewegung bis zum Wendepunkt ein Maass in dem arithmetischen Mittel sämmtlicher Ordinatendifferenzen vom Anfangspunkte bis zum Wendepunkte, und wollen wir bei zwei verschiedenen Curven die mittleren Verkürzungsgeschwindigkeiten vergleichen, so haben wir nur das Verhältniss jener arithmetischen Mittel zu bilden.

Digitized by Google

Wir messen also die mittlere Verkürzungsgeschwindigkeit durch die tg desjenigen Winkels, um welchen die Verbindungslinie des Wendepunktes mit dem Anfang der Bewegung gegen die Abscissenaxe geneigt ist.

In der folgenden Tabelle finden sich für den schon früher betrachteten Versuch V die Verhältnisse der maximalen und der mittleren Geschwindigkeiten des Muskels verzeichnet. Bezüglich der Berechnung der mittleren Verkürzungsgeschwindigkeit ist zu bemerken, dass die Messung der Coordinaten nicht schon im Anfangspunkte der Bewegung, an welcher Stelle die Curve von der Abscissenaxe sich löst, ihren Anfang nimmt, sondern in der Regel etwas später; dieser Umstand ist jedoch nicht geeignet, zu einer wesentlichen Entstellung des Resultates Anlass zu geben.

Trägheitsmoment.	Verhältn. der maximalen Verkürzungsgeschwindigkeiten	Verhältn. der mittleren Verkürzungsgeschwindigkeiten
Minimalmoment	1 :	1 :
Stab (12)	: 1.00	: 0.78
Stab (18)	: 0.78	: 0.78
	: 0.78	: 0.80
	: 0.70	: 0.68
Stab (24)	: 0.56	: 0.59
Stab (32)	: 0.41	: 0.42
	: 0.37	: 0.37
Stab (40)	: 0.20	: 0.22

Das Resultat ist also, dass sowohl die maximale als die mittlere Verkürzungsgeschwindigkeit mit wachsendem Trägheitsmoment beständig abnehmen.

7. Constantes Trägheitsmoment, variabele Anfangsspannung. Wendepunkt, Arbeit und Wärme.

Ich beginne sogleich mit der Darlegung der Versuchsresultate und wähle hierzu einen am 5/XI. 88 angestellten Versuch.

Digitized by Google

Versuch XLVIII.

Constantes Trägheitsmoment Stab (28).

Anfangs-spannung.	Coordinaten des Wendepunkts. Abscisse.	Ordinate.	Coordinaten des Gipfelpunkts. Abscisse.	Ordinate.	Arbeit.	Nadel-ausschlag.
g	mm	mm	mm	mm	gmm	mm
21.88	31.0	11.70	176.0	64.25	1054.40	15.0
21.88 wdh.	?	?	172.0	63.10	1035.58	15.5
33.37	30.0	9.60	165.5	49.50	1239.03	17.0
44.18	28.0	8.90	131.5	39.60	1312.15	18.0
55.45	24.0	6.20	114.5	32.85	1366.29	18.5
66.42	25.0	6.55	102.0	28.35	1412.09	18.5
88.82	24.0	6.20	79.5	22.25	1482.41	17.0
110.60	24.0	6.20	73.0	20.85	1729.78	17.5
133.00	24.0	5.55	64.0	16.65	1661.17	16.5
165.85	19.0	5.30	48.0	15.45	1922.20	16.0

Die unter der Rubrik »Arbeit« stehenden Zahlen habe ich auf die Weise gewonnen, dass ich die auf ihre wahre Länge reducirten Ordinaten des Gipfels mit den entsprechenden Zahlen der ersten Spalte multiplicirte. Dabei aber ist zu bedenken, dass die unter »Anfangsspannung« aufgeführten Zahlen Massen bedeuten, nicht Kräfte. Diese Maasszahlen wären vielmehr noch, ebenso wie die unter »Arbeit« stehenden, mit der Gravitationsconstante zu multipliciren. Da es aber blos auf Verhältnisse ankommt, so können wir uns jene Multiplication ersparen.

Das auffallendste Resultat, welches uns bei Betrachtung der Versuchszahlen entgegentritt, ist dieses, dass Wendepunkt sowohl als Curvengipfel mit wachsender Anfangsspannung immer näher an den Anfangspunkt der Curve heranrücken, und zwar sind beide Coordinaten dieser Punkte in beständiger Abnahme begriffen.

Die Coordinaten des Wendepunktes sind nicht mit Hilfe der Interpolation bestimmt worden, sondern unter Anwendung der Methode der grössten Ordinatendifferenzen. Dieselbe reicht auch vollständig aus, so lange es sich, wie hier, nur darum handelt, zu zeigen, dass die Coordinaten des Wendepunktes mit wachsender Anfangsspannung sich beständig verringern.

Bemerkenswerth aber ist es, dass, trotzdem der Wendepunkt mit wachsender Anfangsspannung immer früher eintritt, doch die mittlere Geschwindigkeit des Muskels auf der Strecke vom Beginn

Digitized by Google

der Bewegung bis zur Inflexion immer geringer wird. Dies ist aus der folgenden Tabelle ersichtlich:

Anfangs-spannung g	Verhältnisse der mittleren Verkürzungs-Geschwindigkeiten
21.88	1 :
21.88 wdh.	: 0.95
33.37	: 0.93
44.18	: 0.91
55.45	: 0.78
66.42	: 0.80
88.82	: 0.78
110.60	: 0.78
133.00	: 0.69
165.85	: 0.70

Auch kann gezeigt werden, dass die maximale Geschwindigkeit des Muskels mit wachsender Anfangsspannung immer kleiner wird.

Uebrigens gilt für die vorliegenden Versuche ein ähnlicher Satz, wie für die mit constanter Anfangsspannung und variabelem Trägheitsmoment: nämlich hier wie dort erreichen Arbeit sowohl als Wärme mit zunehmender Anfangsspannung (resp. zunehmendem Trägheitsmoment) ein Maximum, und das Wärmemaximum tritt früher ein als das Arbeitsmaximum. In dem angeführten Versuche ist das Arbeitsmaximum noch gar nicht überschritten worden: ich hielt es nicht für rathsam, den Muskel mit einer noch grösseren Anfangsspannung als 165.85 g, bei welcher an der Axe beinahe 1500 g hingen, zu versehen.

9. Versuche mit extremen Trägheitsmomenten.

Zur Vergleichung der bei abwechselnder Anwendung des Minimal- und Maximalmoments, sowie derselben Anfangsspannung gewonnenen Arbeits- und Wärmewerthe habe ich mich zunächst durch besonders angestellte Vorversuche mit einer Drehaxe und einem Schreibhebel von sehr geringer Masse und sehr geringem Trägheitsmoment überzeugt, dass die bei Anwendung des Minimalmoments resultirenden Arbeits- und Wärmegrössen durch weitere Verringerung

Digitized by Google

des Trägheitsmoments in nennenswerther Weise nicht mehr herabgedrückt werden können.

Die bei Anwendung des von mir benutzten Minimalmoments erhaltenen Arbeits- und Wärmemengen nähern sich also sehr den dem Trägheitsmoment Null zugehörigen, welche man, wie früher erwähnt, gewinnt, wenn man den Muskel bei frei hängender Masse zur Zuckung veranlasst.

Andererseits sind die Muskelzuckungen bei Anwendung des Maximalmoments als isometrische Zuckungen, wie sie FICK untersucht hat, zu betrachten. Aber die bei isometrischen Zuckungen resultirenden Wärmemengen werden nur sehr wenig von denen differiren, die der an der Zuckung verhinderte Muskel bei der Reizung entwickelt.

Was also die bei Anwendung des Minimal- und des Maximalträgheitsmoments erzeugten Wärmemengen betrifft, so werden sie sich von den zu den Trägheitsmomenten 0 und ∞ gehörigen kaum unterscheiden.

Ein am 19/XI. 88 angestellter Versuch (LXII), bei welchem der Muskel mit 66.42 g belastet war, ergab folgende Resultate:

Nadelausschlag	Hubhöhe
Minimalmoment	
12.5	7.73
12.0	8.25
13.0	7.80
14.0	8.33
14.0	7.39
13.5	7.43
Maximalmoment.	
21.5	1.35
21.0	1.50
19.0	1.58
18.0	1.46
17.0	1.69
16.5	1.54
Minimalmoment	
9.0	7.09
9.0	6.71
9.5	7.05
8.5	6.71

Digitized by Google

Durch Mittelziehungen findet man für das Verhältniss der Wärmemengen bei minimalem und bei maximalem Trägheitsmoment:

1 : 1.69,

und für das Verhältniss der Arbeitsgrössen bei denselben Momenten:

1 : 0.21.

Dabei verhalten sich die Trägheitsmomente wie:

1 : 7799.5.

Für den oben aufgeführten Versuch LXI sind die entsprechenden unter fast denselben Umständen gewonnenen Zahlen:

1 : 1.41

und

1 : 0.25.

10. Ermüdungsversuche.

Die Ausführung derselben geschah in der Weise, dass ich während einer ganzen Reihe von Versuchen Anfangsspannung sowohl als Trägheitsmoment unverändert liess.

In den Figuren der Tafel VI, welche eine Reihe von Ermüdungscurven darstellen, betrug die constante Anfangsspannung 66.42 g und das constante Trägheitsmoment war das dem Stab (28) zugehörige. Um die Tafel nicht zu überladen, ist jedoch nur etwa die Hälfte der Curven aufgenommen, sodass von der ersten zur letzten fortschreitend in der Regel je eine Curve übersprungen wurde.

Ich will die Resultate sämmtlicher Einzelversuche derselben Reihe von Experimenten, von deren zugehörigen Curven in der erwähnten Tafel VI ein Theil gezeichnet vorliegt, jetzt mittheilen. Die vollständige Reihe enthält 29 Einzelversuche und der letzte Reiz traf den Muskel 44 Minuten nach Eintritt des ersten, also ist der Durchschnittsbetrag der Pause zwischen je zwei Reizen etwa 1½ Minuten.

Versuch XVIII.

Nadelausschlag	Maximum		Wendepunkt	
	Abscisse	Ordinate	Abscisse	Ordinate
mm	mm	mm	mm	mm
19.0	75.0	19.95	21.0	6.20
17.0	73.5	18.65	20.0	5.50
15.0	73.0	18.00	20.0	4.80

Digitized by Google

Nadelausschlag	Maximum		Wendepunkt	
	Abscisse	Ordinate	Abscisse	Ordinate
mm	mm	mm	mm	mm
15.0	72.5	17.00	20.5	4.60
15.0	69.5	16.10	19.5	3.90
14.0	68.0	15.40	19.0	4.15
13.0	65.5	15.00	19.0	4.15
12.0	62.5	13.95	20.0	4.35
10.5	63.0	13.70	20.0	4.25
10.5	67.0	15.10	20.5	4.45
10.5	62.5	13.10	21.0	4.40
10.0	62.0	12.00	?	?
9.5	62.0	11.45	20.5	3.50
8.5	59.0	10.90	20.0	3.65
8.0	58.0	10.40	21.0	3.80
7.5	57.0	10.20	19.0	3.30
7.5	56.5	9.80	19.0	3.00
7.5	54.5	9.00	20.0	3.10
7.5	54.0	8.35	16.5	1.75
7.5	52.0	8.10	19.0	2.80
7.0	51.5	8.00	15.5	1.90
7.0	51.0	7.50	17.5	2.15
7.0	49.5	7.15	15.5	1.75
7.0	49.0	6.85	17.0	1.85
7.0	48.5	6.65	—	—
6.5	46.0	6.15	—	—
6.0	45.0	6.10	—	—
5.0	44.0	6.00	—	—
5.5	42.0	6.00	—	—

Arbeitsleistung sowohl als Wärmeentwickelung sinken also mit fortschreitender Ermüdung, und diesem Sinken der Arbeits- und der Wärmemengen geht eine beständige Abnahme der Gleichgewichtshöhen parallel. Auch die Abscissen der Wendepunkte, sowie der Maxima werden immer kleiner. Und diesen Sätzen können noch die folgenden beiden hinzugefügt werden: sowohl die maximale als die mittlere Verkürzungsgeschwindigkeit vom Beginn der Bewegung bis zum Wendepunkt vermindern sich mit steigender Ermüdung. Zwar wird das Gesetz der beständigen Abnahme der Inflexionsabscissen insofern durchbrochen, als die Glieder der Abscissenreihe nach einer anfänglichen geringen Abnahme eine ebenso geringe Zunahme aufzeigen, um dann verhältnissmässig schnell sich zu verringern. Dass dieser Umstand seine ausreichende Erklärung findet durch die Unver-

Digitized by Google

meidlichkeit kleiner Fehler sowohl in der Bestimmung des Momentes des Reizeintrittes, von welchem ab die Abscissen gerechnet werden, als auch in der Bestimmung des Wendepunktes überhaupt, geht daraus hervor, dass ich über Versuche verfüge, bei welchen jenes Gesetz klarer hervortritt. Als Beispiel führe ich folgenden Versuch an.

Versuch LXVI.

Anfangsspannung 165.85 g. Trägheitsmoment Stab (28).

Nadelausschlag	Maximum		Wendepunkt	
	Abscisse	Ordinate	Abscisse	Ordinate
27.0	55.0	13.00	29.0	7.10
24.0	54.5	12.75	27.0	6.25
21.5	55.0	12.30	24.0	5.30
18.5	53.0	11.85	25.0	4.70
16.5	51.0	11.50	23.0	4.60
15.5	50.5	10.55	23.5	4.15
15.0	50.5	10.15	23.0	3.70
15.5	49.5	11.05	22.0	4.55
14.5	47.5	10.00	22.0	4.10
14.0	44.5	10.65	20.0	4.30
13.0	44.5	9.95	20.5	4.15

Uebrigens ist zu bedenken, wie schwierig es bei den geringen Unterschieden aufeinander folgender Curven ist, ein exactes Resultat zu erzielen.

Aus den mitgetheilten Zahlen ergiebt sich, dass die Aenderung, welche am Zuckungsverlauf in Folge der Ermüdung sichtbar wird, verschieden ausfällt, je nachdem die Verkürzung frei oder durch träge Massen gehemmt stattfindet. Seit den Mittheilungen von Helmholtz ist bekannt, dass bei freier Verkürzung die Zuckungsdauer mit steigender Ermüdung sich verlängert.

Die genaue Betrachtung der Figuren der Tafel VI zeigt nun, dass mit fortschreitender Ermüdung die sogenannte »Latenzdauer« gleichfalls wächst, woraus hervorgeht, dass ein immer grösser werdender Bruchtheil der bei der Zuckung entwickelten, von Versuch zu Versuch ohnehin schon abnehmenden Kräfte darauf verwendet werden muss, das System in Bewegung zu setzen. Diese Wahrnehmung macht das erhaltene, von früheren abweichende Resultat verständlich. Zur Erklärung dieses Unterschiedes können auch die von Fick

Digitized by Google

und v. Kries[1]) untersuchten gehemmten Zuckungen herbeigezogen werden.

Es gewährt noch Interesse, das Verhalten des Muskels bei beständiger Anwendung des maximalen Trägheitsmoments zu beobachten. Hier zeigt sich, sofern man den Versuch mit dem frischen, unermüdeten Muskel beginnt, anfänglich eine sehr schnelle Abnahme der Nadelausschläge, welcher eine gleich schnelle der Hubhöhen nicht parallel geht.

Dieses Verhalten des Muskels wird erläutert durch die Zahlen des folgenden Versuchs, bei welchem die constante Anfangsspannung 66.42 g betrug.

Versuch LXV.

Nadelausschlag	Hubhöhe	Nadelausschlag	Hubhöhe
28.0	2.85	14.0	2.74
20.0	2.85	13.0	2.70
18.0	2.81	13.0	2.48
16.0	2.74	13.0	2.33
14.0	2.55	12.0	2.21
13.5	2.63	11.5	1.95
14.0	2.78	11.5	2.25

Die Pausen zwischen den einzelnen Reizen betragen durchschnittlich wieder 1½ Min. Auffällig ist die Grösse des ersten Nadelausschlages (28 mm) im Verhältniss zu der aller übrigen, um so auffälliger, weil der zugehörige Hub mit dem des nächstfolgenden Versuchs genau übereinstimmt, obwohl der Nadelausschlag dieses Versuchs um nicht weniger als 8 mm geringer ist als der erste. Nun ist zu bedenken, dass der dem Nadelausschlag von 28 mm entsprechende Reiz überhaupt der erste war, welchen ich dem Muskel applicirte — keiner war vorangegangen. Dieselbe Erscheinung, dass der erste, den Muskel treffende Reiz einen besonders grossen Nadelausschlag erzeugte, der zur Grösse der folgenden, unter denselben Versuchsbedingungen hervorgerufenen in einem Missverhältniss steht, habe ich mehrfach, aber nicht regelmässig beobachtet. Eine gleiche Beobachtung hat im Würzburger Laboratorium Danilewsky gemacht, als er, mit Versuchen zur Bestimmung des mechanischen Wärmeäquivalents am Muskel beschäftigt, die Wärmemenge maass, welche durch

1) Untersuchungen zur Mechanik des quergestreiften Muskels. Du Bois-Reymond's Arch., 1880.

Digitized by Google

mechanische Erschütterung des Muskels hervorgerufen wurde. Fick[1]) erklärt die Erscheinung aus der mit der Erschütterung verbundenen Zerrung der Muskelfasern, welche sich bei der ersten Zuckung des Muskels nicht gleichmässig auf sämmtliche Fasern desselben vertheile, weil vermöge der besonderen anatomischen Beschaffenheit eines Präparats es der Fall sein könne, dass einzelne der Thermosäule anliegende Faserbündel stärker als andere gespannt wären, folglich auch stärker erschüttert würden und ihre Temperatur sich mehr erhöhte. Weil aber die stärker gespannten Faserbündel nach der ersten Erschütterung eine bleibende Reckung erfahren, so beschränke sich der Eintritt der Erscheinung auf den ersten Versuch. Ich bin der Meinung, dass die bei meinen Versuchen beobachtete Erscheinung auf dieselbe Weise sich erklärt. Nach den Erfahrungen Lukjanow's[2]) ist es jedoch ebenso wahrscheinlich anzunehmen, dass sich im frischen Muskel bei besonders langen Erholungspausen bedeutende Mengen durch Reizung umsetzbarer Stoffe ansammeln, von welchen ein verhältnissmässig grosser Theil gleich bei der ersten Zuckung zur Wärmebildung verbraucht wird, was bei der relativen Unabhängigkeit von Wärme und Arbeit wohl möglich ist.

11. Uebersicht der Ergebnisse.

A. Methoden zur Wendepunktsbestimmung. Die Methode der grössten Ordinatendifferenzen liefert nur für die bei Anwendung des Minimalmoments gewonnenen Zuckungscurven genaue Resultate, weil sie die Thatsache, dass die Geschwindigkeit des von dem Muskel in Bewegung gesetzten Systems vor dem Wendepunkte schneller wächst, als sie nach demselben abnimmt, unberücksichtigt lässt. Die angewandte Interpolationsmethode verdient vor dem ersteren Verfahren den Vorzug, sofern man sich bei ihrer Benutzung der Vorsicht bedient, das eine Paar der vier Curvenpunkte, deren man bei Anwendung der Methode mindestens benöthigt, auf dem einen convexen, das andere Punktepaar auf dem anderen concaven Curventheil zu wählen,

1) Mechanische Arbeit und Wärmeentwickelung bei der Muskelthätigkeit, Leipzig 1882. S. 176 u. 177.

2) Wärmelieferung und Arbeitskraft des blutleeren Säugethiermuskels. Du Bois-Reymond's Arch., 1886, Suppl.

Digitized by Google

und wenn man die vier Punkte, deren Abscissen sich um gleiche Stücke unterscheiden müssen, weit auseinander rückt.

B. Geschwindigkeit des Muskels und des von ihm bewegten Systems. Die Verkürzungsgeschwindigkeit des Muskels ist von der auf den Umfang der Rolle, an welcher die Muskelkraft angreift, bezogenen Winkelgeschwindigkeit des Systems zu unterscheiden. Beide Geschwindigkeiten sind — mit Null anhebend und im Wendepunkt ein Maximum erreichend — einander gleich bis zu einer zwischen Wendepunkt und Curvengipfel gelegenen Stelle, von welcher ab die Verkürzungsgeschwindigkeit des Muskels kleiner ist und bleibt, als die Geschwindigkeit des Systems. Die aufgeschriebene Curve ist von jener Stelle ab eine Parabel und bleibt eine solche, bis die Schreibstiftspitze die Abscissenaxe wieder erreicht. Ausgenommen hiervon sind die bei Anwendung des minimalen Trägheitsmoments und geringer Anfangsspannungen sich ergebenden Curven, welche der Abscissenaxe asymptotisch sich nähern und darum vielleicht noch als isotonische betrachtet werden dürfen.

C. Muskelkraft. Die zu Beginn der Bewegung ihrem absoluten Betrage nach der Anfangsspannung gleiche Muskelkraft wächst bis zu einer vor dem Wendepunkt gelegenen, analytisch durch das Verschwinden des dritten Differentialquotienten der Muskelcurve, geometrisch aber nicht charakterisirten Stelle, von welcher ab sie sich beständig verringert, sodass sie im Wendepunkt bereits wieder so gross ist, als sie zu Beginn der Bewegung war. Die Bestimmung der Muskelkraft in einem beliebigen Punkte der Muskelcurve (im engeren Sinne) fällt im Wesentlichen zusammen mit der Bestimmung des zweiten Differentialquotienten der Curve in demselben Punkte.

D. Constante Anfangsspannung, variabeles Trägheitsmoment. α) Bei wachsendem Trägheitsmoment steigt und sinkt die Muskelarbeit, sodass sie für ein gewisses mittleres, relativ (d. h. im Verhältniss zur Grösse des die Arbeit Null erzeugenden) geringes Trägheitsmoment ein Maximum erreicht. Die Muskelwärme verhält sich ebenso, und ihr Maximum tritt früher ein als das der Arbeit, gleichviel, ob man am unermüdeten Muskel den Versuch mit der Reihe der auf- oder der absteigenden Trägheitsmomente beginnt.

Die Unterschiede der Wärme sind relativ viel weniger beträchtlich, als die der Arbeit.

Digitized by Google

Betrachtet man Arbeit und Wärme als Functionen des Trägheitsmoments, so sind »Arbeitscurve« sowohl als »Wärmecurve« im aufsteigenden Theile gegen die Abscissenaxe concav und haben im absteigenden Theile je einen Wendepunkt. Die Arbeitscurve nähert sich der Abscissenaxe asymptotisch, und die Wärmecurve zwar nicht der Axe selbst, wohl aber einer Parallelen zu ihr, weil der mit unendlich grossem Trägheitsmoment behaftete, d. h. an der Verkürzung verhinderte, Muskel noch Wärme erzeugt. Beide Curven gehen nicht durch den Anfangspunkt der Coordinaten, für welchen das Trägheitsmoment verschwindet, weil der bei frei hängendem Gewicht zur Zuckung veranlasste Muskel Arbeit sowohl als Wärme producirt.

Der Anstieg der Arbeitscurve ist um so steiler, je geringer die Anfangsspannung; die Curve verflacht sich jedoch immer mehr, und ihre Ordinaten werden gleichzeitig immer kleiner, je grösser man die Anfangsspannung wählt, woraus jedoch nicht auf eine parallel gehende Verringerung der Zuckungsarbeit geschlossen werden darf.

β) Bei wachsendem Trägheitsmoment entfernen sich Wendepunkt und Gipfelpunkt der Muskelcurve vom Anfangspunkt der letzteren, und die Gleichgewichtshöhe, die Ordinate des Wendepunktes, steigt und sinkt mit der der Muskelarbeit proportionalen Ordinate des Gipfels.

γ) Bei wachsendem Trägheitsmoment sind die im Wendepunkt eintretende maximale und die mittlere Verkürzungsgeschwindigkeit des Muskels auf der Strecke vom Anfang der Bewegung bis zum Wendepunkt in beständiger Abnahme begriffen.

E. Constantes Trägheitsmoment, variabele Anfangsspannung. α) Bei wachsender Anfangsspannung steigen und sinken Arbeit und Wärme, und das Wärmemaximum erscheint früher als das Arbeitsmaximum.

β) Bei wachsender Anfangsspannung nähern sich Wendepunkt und Gipfelpunkt der Muskelcurve deren Anfangspunkt, sodass beide Coordinaten dieser Punkte sich beständig verkleinern.

γ) Bei wachsender Anfangsspannung nehmen die maximale und die mittlere Verkürzungsgeschwindigkeit auf der Strecke vom Anfangspunkte bis zum Wendepunkte beständig ab.

F. Constante Anfangsspannung, constantes Trägheitsmoment. Bei beständiger Wiederholung des Versuchs nehmen Arbeit

Digitized by Google

und Wärme, ferner die Coordinaten des Wendepunkts und des Gipfels, sowie die maximale und die mittlere Verkürzungseschwindigkeit fortwährend ab.

Anhang.

I. Zur Theorie des Schreibapparats.

1. Beziehung zwischen der Grösse der Fadenabwickelung (s) und dem auf der Trommel verzeichneten Hub (S). Nennt man R den Radius der Rolle, von welcher sich der mit dem Muskel verknüpfte Faden während des aufsteigenden Theils der Bewegung des Systems abwickelt, und ist φ der dem Kreisbogen von der Länge s zugehörige Winkel, so hat man zunächst:

$$1) \quad s = R\varphi.$$

Bezeichnet man noch die Entfernung des Drehpunktes von der Spitze des Schreibstifts, die während der Bewegung des Systems beständig mit der Trommel in Berührung sein muss, mit a, die halbe Länge des Schreibhebels, gerechnet vom in der horizontalen Drehaxe des Systems liegenden Hebelschwerpunkt bis zu dem in der Verlängerung der geometrischen Axe des prismatischen Schreibhebels gelegenen Drehpunkt des Schreibstifts, mit b, ferner mit c die Länge derjenigen von der Drehaxe des Systems ab gemessenen Strecke, deren Endpunkt man erhält, wenn man in der Anfangsstellung des Systems die dann in horizontaler Lage befindliche geometrische Axe des Hebels sich so weit verlängert denkt, bis sie die um eine verticale Axe rotirende Trommel trifft, und definirt schliesslich eine Hilfsconstante e durch:

$$2) \quad e = +\sqrt{a^2 - (c - b)^2},$$

so liest man folgende Beziehung zwischen S und φ von der nebenstehenden Figur 1 ab:

$$3) \quad S = e + b \sin\varphi - \sqrt{a^2 - (c - b\cos\varphi)^2}.$$

Setzt man:

$$4) \quad S - e = \sigma$$

Digitized by Google

und führt damit σ als neue Veränderliche ein, so hat man auch:

$$(\sigma - b \sin \varphi)^2 + (c - b \cos \varphi)^2 = a^2,$$

also, wenn man ausquadrirt:

$$2b(\sigma \sin \varphi + c \cos \varphi) = \sigma^2 - a^2 + b^2 + c^2.$$

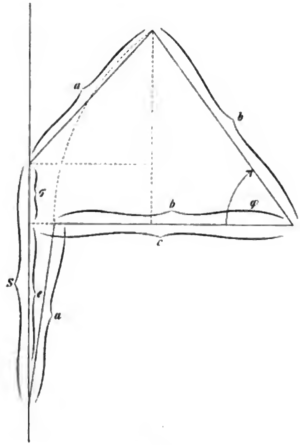


Fig. 1.

Diese Gleichung, die für $\sigma = 0$ den Cosinussatz für das Dreieck (a, b, c) mit φ als Gegenwinkel von a darstellt, hat die Form:

$$A \sin \varphi + B \cos \varphi = C,$$

ergiebt also gelöst nach sin φ:

$$\sin \varphi = \frac{AC \pm B\sqrt{A^2 + B^2 - C^2}}{A^2 + B^2};$$

mithin ist:

$$\cos \varphi = \frac{BC \mp A\sqrt{A^2 + B^2 - C^2}}{A^2 + B^2},$$

und:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{AC \pm B\sqrt{A^2 + B^2 - C^2}}{BC \mp A\sqrt{A^2 + B^2 - C^2}}.$$

Digitized by Google

Setzt man für A, B, C ihre Werthe und berücksichtigt, dass für $S = 0$ oder $\sigma = -e$ auch $\varphi = 0$ sein muss, so erhält man:

$$5)\quad \operatorname{tg}\varphi = \frac{\sigma(\sigma^2 - a^2 + b^2 + c^2) + c\sqrt{4b^2(\sigma^2 + c^2) - (\sigma^2 - a^2 + b^2 + c^2)^2}}{c(\sigma^2 - a^2 + b^2 + c^2) - \sigma\sqrt{4b^2(\sigma^2 + c^2) - (\sigma^2 - a^2 + b^2 + c^2)^2}}.$$

Diese Formel stellt die tg des Drehwinkels φ des Systems dar als Function der Hubhöhe S; man kann also jenen Winkel und wegen 4) auch s, die gesuchte Grösse der Fadenabrollung, mit Hilfe der Formel berechnen, wenn die Constanten a, b, c und die mit ihnen in Zusammenhang stehende Hilfsconstante e bekannt sind.

An die Formel 5), welche sich dazu ihrer Symmetrie wegen besonders eignet, wollen wir weitere Betrachtungen knüpfen. Zuvörderst ist zu bedenken, dass der den beiden Wurzeln gemeinschaftliche Radicand

$$4b^2(\sigma^2 + c^2) - (\sigma^2 - a^2 + b^2 + c^2)^2$$

auch unter der Form geschrieben werden kann:

$$6)\quad 4a^2b^2 - (a^2 + b^2 - c^2 - \sigma^2)^2.$$

Die Wurzeln sind also reell, so lange der ihnen gemeinsame Radicand 6) $\geqq 0$ ist, woraus sich zwei Grenzen für σ^2 ergeben, nämlich:

$$(a - b)^2 - c^2 \leqq \sigma^2 \leqq (a + b)^2 - c^2.$$

Fällt σ^2 mit einer dieser beiden Grenzen zusammen, so liegt die Schreibstiftspitze in der verlängerten geometrischen Axe des Schreibhebels.

Führt man die Abkürzungen ein:

$$7)\quad \begin{cases} x = \sigma^2 - a^2 + b^2 + c^2, \\ y = \sqrt{4b^2(\sigma^2 + c^2) - (\sigma^2 - a^2 + b^2 + c^2)^2}, \\ z = \sigma^2 + c^2, \end{cases}$$

so folgt:

$$8)\quad x^2 + y^2 = 4b^2 z,$$

und wenn man ferner setzt:

$$9)\quad \begin{cases} u = \sigma x + c y, \\ v = c x - \sigma y, \end{cases}$$

so liefert die Auflösung dieser Gleichungen nach x und y:

$$10)\quad \begin{cases} xz = \sigma u + c v, \\ yz = c u - \sigma v. \end{cases}$$

Digitized by Google

Durch Quadriren und Addiren dieser beiden letzten Gleichungen resultirt:

$$(x^2 + y^2)\, z = u^2 + v^2,$$

folglich wegen 8):

$$11)\quad u^2 + v^2 = 4 b^2 z^2.$$

Hierzu gelangt man auch durch Quadriren und Addiren der Gleichungen 9).

Bei Anwendung der eingeführten abkürzenden Bezeichnungen können wir die Gleichung 5) schreiben in der Form:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{u}{v},$$

woraus wegen 4) sich ergiebt:

$$12)\quad \frac{s}{R} = \operatorname{arc\,tg} \frac{u}{v}.$$

2. Erster Differentialquotient der Fadenabwickelung nach dem Hub. Bezeichnet man die Differentiationen nach σ durch obere Indices, setzt also insbesondere:

$$s' = \frac{ds}{d\sigma}, \quad s'' = \frac{d^2 s}{d\sigma^2},$$

so ergiebt sich durch Differentiation der Gleichung 12):

$$\frac{s'}{R} = \frac{v u' - u v'}{u^2 + v^2},$$

und darin ist:

$$u' = 2\sigma^2 + x + c y',$$
$$v' = 2 c \sigma - y - \sigma y',$$

mithin:

$$v u' = 2 c \sigma^2 x - 2 \sigma^2 y + c x^2 - \sigma x y + c^2 x y' - c \sigma y y',$$
$$u v' = 2 c \sigma^2 x + 2 c^2 \sigma y - c y^2 - \sigma x y - \sigma^2 x y' - c \sigma y y',$$

daher bei Berücksichtigung der letzten Gleichung 7) und der Gleichung 8):

$$v u' - u v' = z\,(4 b^2 c - 2 \sigma y + x y').$$

Zur Bestimmung des Differentialquotienten von y erhält man aus der differentiirten Gleichung 8):

$$x y y' = 4 b^2 \sigma x - 2 \sigma x^2.$$

und durch Substitution dieses Werthes in den mit y erweiterten letzterhaltenen Ausdruck für $v u' - u v'$:

Digitized by Google

$$vu' - uv' = \frac{z}{y}\Big(4b^2(\sigma x + cy) - 2\sigma(x^2 + y^2)\Big),$$

mithin, wenn man wieder die Gleichung 8) und dazu die erste der Definitionsgleichungen 9) in Betracht zieht:

$$vu' - uv' = \frac{4b^2 z}{y}(u - 2\sigma z),$$

also schliesslich wegen 11):

$$13)\quad \frac{s'}{R} = \frac{u - 2\sigma z}{yz}.$$

3. Zweiter Differentialquotient. Man hat:

$$\frac{s''}{R} = \frac{yz(u' - 2\sigma z' - 2z) - (u - 2\sigma z)(yz' + zy')}{y^2 z^2}$$
$$= \frac{yz(x - 2\sigma^2 - 2z + cy') - (u - 2\sigma z)(2\sigma y + zy')}{y^2 z^2}.$$

Erweitert man mit y und sondert die yy' enthaltenden Glieder von den davon freien, so kommt:

$$\frac{s''}{R} = \frac{y^2 z(x - 2z - 2\sigma^2) - (u - 2\sigma z)2\sigma y^2 + zyy'(cy - u + 2\sigma z)}{y^3 z^2};$$

endlich durch Elimination von yy':

$$14)\quad \frac{s''}{R} = \frac{y^2(cv - \sigma u - 2c^2 z) + 2\sigma^2 z(x - 2z)(x - 2b^2)}{y^3 z^2}.$$

4. Die reellen Wurzeln der durch Nullsetzung des ersten Differentialquotienten resultirenden Gleichung. $s' = 0$ zieht nach sich: $u - 2\sigma z = 0$. Geht man zurück auf die Definitionsgleichung von u und setzt für y den aus 8) sich ergebenden Werth, so kann dafür geschrieben werden:

$$\sigma^2(x - 2z)^2 = c^2(4b^2 z - x^2).$$

Berücksichtigt man, dass $z = \sigma^2 + c^2$, so resultirt durch weitere Umformung dieser Gleichung:

$$z(x^2 + 4\sigma^2 z - 4\sigma^2 x - 4b^2 c^2) = 0.$$

Da z für reelle Werthe von σ nicht verschwinden kann, so erhält man durch Einführung der Ausdrücke für x und z aus den Gleichungen 7) in den anderen Factor auf der linken Seite der letzten Beziehung folgende Bestimmungsgleichung für die Unbekannte σ:

$$(\sigma^2 + a^2 - b^2 - c^2)^2 + 4\sigma^2 c^2 - 4b^2 c^2 = 0,$$

Digitized by Google

oder endlich geordnet nach fallenden Potenzen von σ^2:

$$15)\ \sigma^4 + 2(a^2 - b^2 + c^2)\sigma^2 + a^4 + b^4 + c^4 - 2a^2b^2 - 2b^2c^2 - 2c^2a^2 = 0.$$

Diese in Bezug auf σ^2 quadratische Gleichung ergiebt darnach aufgelöst:

$$16)\ \sigma^2 = b^2 - (a \pm c)^2.$$

Nun sind aber die Constanten a, b, c nicht völlig von einander unabhängig, sondern sie gehorchen den Ungleichungen:

$$b < c < a + b,$$

oder:

$$17)\ 0 < c - b < a.$$

Wegen $b < c$ ist aber umsomehr $b < a + c$, also liefert der dem oberen Zeichen in der Gleichung 16) entsprechende Ausdruck von σ^2 für σ selbst einen imaginären Werth, und was den dem unteren Zeichen correspondirenden betrifft, so ergiebt er nur dann ein reelles σ, wenn $b^2 \geqq (a - c)^2$, welcher Bedingung auf zweierlei Art genügt werden kann. Einmal nämlich durch $b \geqq a - c$ oder $a \leqq b + c$, das andere Mal durch $b \geqq c - a$, oder $a \geqq c - b$. Liegt also a zwischen $c - b$ als unterer und $c + b$ als oberer Grenze, in Zeichen:

$$18)\ c - b \leqq a \leqq c + b,$$

so ist σ reell und die Gleichung $s' = 0$ hat dann zwei entgegengesetzt gleiche reelle Wurzeln:

$$19)\ \sigma = \pm \sqrt{b^2 - (a - c)^2}.$$

Wenn jedoch $(a - c)^2 > b^2$ ist, welche Bedingung gleichfalls auf zweierlei Art erfüllt werden kann, insofern als daraus die Ungleichungen fliessen:

$$20)\ c - b > a > c + b,$$

so hat $s' = 0$ keine reelle Wurzel.

Das absolute Glied der Gleichung 15) hat bei Giltigkeit der Ungleichungen 18) eine einfache Bedeutung. Bezeichnet man die beiden Wurzeln jener für σ^2 quadratischen Gleichung mit σ_1^2 und σ_2^2, so folgt aus 16):

$$\begin{aligned}\sigma_1^2\sigma_2^2 &= \bigl(b^2 - (a + c)^2\bigr)\bigl(b^2 - (a - c)^2\bigr) \\ &= -(a + b + c)(a + b - c)(a - b + c)(-a + b + c) \\ &= -16\Delta^2,\end{aligned}$$

Digitized by Google

wenn mit Δ der Inhalt des Dreiecks (a, b, c) bezeichnet wird. Man kann mithin der Gleichung 15) die Form geben:

$$\sigma^4 + 2(a^2 - b^2 + c^2)\sigma^2 - 16\Delta^2 = 0,$$

woraus hervorgeht, dass das negativ genommene absolute Glied in 15) = dem Quadrat der vierfachen Fläche des Dreiecks (a, b, c) ist.

Aus

$$\sigma_1^2\sigma_2^2 + 16\Delta^2 = 0$$

ist überdies unmittelbar ersichtlich, dass die Wurzeln σ_1^2 und σ_2^2 entgegengesetzte Zeichen haben.

Bestehen jedoch die Ungleichungen 20), in welchem Falle beide Wurzeln σ_1^2, σ_2^2 negativ sind, so hat das absolute Glied in 15) obige Bedeutung nicht, weil dann a, b, c nicht Dreiecksseiten sein können.

5. Auswerthung des zweiten Differentialquotienten für die reellen Wurzeln des = 0 gesetzten ersten. Aus $u - 2\sigma z = 0$ oder $u = 2\sigma z$ folgt wegen 11):

$$v = 2z\sqrt{b^2 - \sigma^2}.$$

Führt man diese Werthe von u und v in die Gleichungen 10) ein, so erhält man:

$$x = 2(\sigma^2 + c\sqrt{b^2 - \sigma^2}),$$
$$y = 2\sigma(c - \sqrt{b^2 - \sigma^2}),$$

und daraus:

$$x - 2z = -2c(c - \sqrt{b^2 - \sigma^2}),$$
$$x - 2b^2 = 2\sqrt{b^2 - \sigma^2}\,(c - \sqrt{b^2 - \sigma^2}).$$

Eliminirt man aus den beiden letzten Formeln den eingeklammerten Factor mit Hilfe des Werthes von y, so ergiebt sich:

$$\sigma(x - 2z) = -cy,$$
$$\sigma(x - 2b^2) = y\sqrt{b^2 - \sigma^2},$$

mithin:

$$2\sigma^2 z(x - 2z)(x - 2b^2) = -2czy^2\sqrt{b^2 - \sigma^2}.$$

Ferner:

$$cv - \sigma u - 2c^2 z = 2z(c\sqrt{b^2 - \sigma^2} - z).$$

Durch Einsetzung dieser Ausdrücke in den für s'' erhaltenen allgemeinen Werth nimmt derselbe mithin die specielle Form an:

$$s'' = -\frac{2R}{y}.$$

Digitized by Google

Nun ist, wie unter 6) bemerkt,

$$y = \sqrt{4\,a^2\,b^2 - (a^2 + b^2 - c^2 - \sigma^2)^2},$$

und wenn man hierin für σ^2 seinen Werth $b^2 - (a - c)^2$ substituirt:

$$\begin{aligned} y &= \sqrt{4\,a^2 b^2 - (a^2 - c^2 + (a - c)^2)^2} \\ &= \sqrt{4\,a^2\,(b^2 - (a - c)^2)} \\ &= 2\,a\,\sigma;\ \sigma = \pm\sqrt{b^2 - (a - c)^2}. \end{aligned}$$

Also wird $s'' = -\dfrac{R}{a\sigma} \lessgtr 0$ für $\sigma = \pm\sqrt{b^2 - (a - c)^2}$.

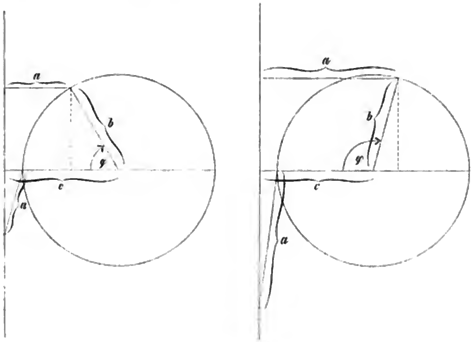


Fig. 2.

Die positive Wurzel von $s' = 0$ entspricht also dem maximalen, die negative dem minimalen Werth der Fadenabrollung. Das Minimum von s kann jedoch nur erreicht werden, wenn das System von der Anfangslage aus nach unten sich bewegt, kommt also für uns nicht in Betracht. Der dem maximalen s zugehörige Grenzwinkel φ wird bestimmt durch $\cos\varphi = \dfrac{c - a}{b}$. Dieser Winkel ist also $< \dfrac{\pi}{2}$, sobald $c - a > 0$, $c > a$, und $> \dfrac{\pi}{2}$, aber $< \pi$, sobald $c - a < 0$, $c < a$. Diese beiden Fälle werden erläutert durch die beifolgenden Figuren.

Die Ungleichungen, bez. Gleichungen 18) bestehen für drei solche Constante a, b, c, die bei Giltigkeit des unteren Zeichens in dem

Digitized by Google

Ausdrucke 16) reelle Wurzeln der Gleichung 15) hervorrufen. Sobald aber a, b, c für den Schreibapparat in Betracht kommen, bestehen von vornherein noch die Ungleichungen 17). In den letzteren aber ist die erste der Ungleichungen 18) schon enthalten, und was die Gleichung $c - b = a$ betrifft, so kann dieselbe, sofern a, b, c für den Schreibapparat in Betracht kommen, nicht bestehen. Wir können mithin in Rücksicht auf die Ungleichungen 17), welche von den Constanten a, b, c stets erfüllt sein müssen, 18) ersetzen durch:

$$a \leqq b + c;$$

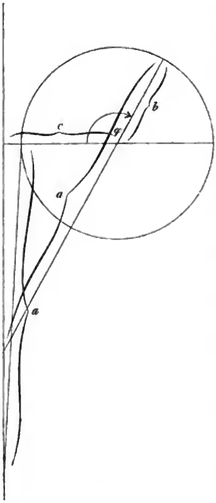


Fig. 3.

und die Ungleichungen 20) sind, wieder mit Rücksicht auf die Ungleichungen 17), ersetzbar durch die eine Ungleichung:

$$a > b + c.$$

Für drei solche Constante hat also der $= 0$ gesetzte erste Differentialquotient der Gleichung 12) keine reellen Wurzeln, doch existirt bei Schreibsystemen, deren Constanten dieselbe Eigenschaft zukommt, ein stets zwischen $\frac{\pi}{2}$ und π gelegener Grenzwinkel φ, der bestimmt ist durch $\cos \varphi = -\frac{c}{a-b} < 0$, und welcher erhalten wird, wenn die Schreibstiftspitze in der verlängerten geometrischen Axe des Schreibhebels liegt, wie es die beifolgende Figur 3 erläutert.

Sowie dieser Grenzwinkel erreicht wird, entsteht ein Stoss, und die Bewegung des Systems nimmt plötzlich ein Ende, während bei den Systemen der anderen Art der für den Grenzwinkel in horizontaler Lage befindliche Schreibstift nach Ueberschreitung dieses Winkels die Trommel verlässt.

6. **Resultat.** Es giebt Schreibsysteme zweierlei Art: für die

Digitized by Google

Systeme der ersten Art ist die Entfernung a des Drehpunktes von der Spitze des Schreibstifts stets $\leqq b + c$, und die durch Nullsetzung des ersten Differentialquotienten der Grösse der Fadenabwickelung nach dem Hub resultirende Bestimmungsgleichung für σ hat dann zwei entgegengesetzt gleiche reelle Wurzeln, für welche der zweite Differentialquotient der Grösse s der Fadenabrollung entgegengesetzt gleiche, reelle, nie verschwindende Werthe annimmt, sodass man ein Maximum und ein Minimum von s erhält. Diese Werthe von s treten ein, wenn die Verbindungslinie der Spitze mit dem Drehpunkt des Schreibstifts in horizontaler Lage sich befindet. Der dem Maximum von s entsprechende Grenzwinkel φ liegt zwischen 0 und π und kann mit der oberen Grenze zusammenfallen.

Für die Systeme der zweiten Art ist $a > b + c$, und der $= 0$ gesetzte erste Differentialquotient der Gleichung 12) ergiebt keine reellen Werthe für σ. Gleichwohl existirt auch hier ein Grenzwinkel φ und ein ihm entsprechendes Maximum von s, welches jedoch in ganz anderer Weise[1]) zu Stande kommt, als bei den Systemen der ersten Art. Bei Erreichung dieses Grenzwinkels, für welchen die Schreibstiftspitze in der verlängerten geometrischen Axe des Schreibhebels gelegen ist, wird das System in seiner Bewegung gehemmt. Der Grenzwinkel φ liegt stets zwischen $\frac{\pi}{2}$ und π, kann keine dieser Grenzen erreichen.

Anmerkung. Für den von mir benutzten Schreibapparat, der zu den Systemen der ersten Art gehört, ist $a = 7^3/_4$, $b = 5^1/_4$, $c = 5^3/_4$ cm. Es ist also hier der Grenzwinkel $\varphi > \frac{\pi}{2}$.

II. Differentialgleichung zur experimentellen Bestimmung des Trägheitsmoments.

Das mitgetheilte Verfahren zur experimentellen Bestimmung des Trägheitsmoments ist die einfachste mehrerer, demselben Zwecke dienender, graphischer Methoden, über die ich verfüge. Bei einer dieser später darzulegenden Methoden mache ich von der im Folgenden abgeleiteten Differentialgleichung Gebrauch, welche die in der vorliegenden Abhandlung benutzte enthält.

1) Es liegt hier ein »Grenzmaximum« vor: für $\sigma^2 < (a - b)^2 - c^2$ wird y imaginär.

Vorgelegt sei eine um eine Horizontale drehbare, starre und im indifferenten Gleichgewicht befindliche Axe, mit welcher $(N+n)$ Rollen, deren Centren in der Drehaxe liegen, starr verbunden seien. Um die N Rollen mit den Radien $R_1, R_2, \ldots, R_N$ sind undehnbare, biegsame Fäden so geschlungen, dass jede der daran gehängten Massen $M_1, M_2, \ldots, M_N$ die Axe in demselben Sinne zu drehen strebt. Ueber die n Rollen mit den Radien $r_1, r_2, \ldots, r_n$ laufen gleichfalls Fäden, an denen resp. die Massen $m_1, m_2, \ldots, m_n$ hängen, welche sämmtlich die Axe in dem dem vorigen entgegengesetzten Sinne in Bewegung zu setzen suchen.

Nennt man:

$$1)\quad \begin{cases} P_N = G\,M_N, & N = 1,\ 2,\ \ldots,\ N, \\ p_\nu = G\,m_\nu, & \nu = 1,\ 2,\ \ldots,\ n \end{cases}$$

die den Massen M_N und m_ν zukommenden Gewichte, so soll vorausgesetzt werden, dass das Gesammtdrehungsmoment:

$$2)\quad \sum_1^N{}^N P_N R_N - \sum_1^n{}^\nu p_\nu r_\nu = G\left\{\sum_1^N{}^N M_N R_N - \sum_1^n{}^\nu m_\nu r_\nu\right\}$$

nicht verschwinde.

Besteht diese Voraussetzung, so wird sich nach Ablauf einer gewissen Zeit t die Axe unter dem Einfluss der an den Fäden hängenden Massen um einen gewissen Winkel φ gedreht haben, und zwar in dem einen oder im entgegengesetzten Sinne, je nachdem das Gesammtdrehungsmoment 2) $\gtrless 0$.

Legen wir ein dreifach-rechtwinkliges Axensystem x, y, z zu Grunde, dessen x-Axe mit der horizontalen Drehaxe zusammenfällt, während die z-Axe die Richtung der Schwere hat, so gelten, wenn wir uns noch ein zweites, mit der Drehaxe fest verbundenes und für $\varphi = 0$ mit dem System x, y, z coincidirendes System ξ, η, ζ denken, folgende Formeln:

$$3)\quad \begin{cases} x = \xi, \\ y = \eta \cos\varphi - \zeta \sin\varphi, \\ z = \eta \sin\varphi + \zeta \cos\varphi. \end{cases}$$

Wir denken uns ferner $(N+n)$ andere dreifach-rechtwinklige Coordinatensysteme U_N, V_N, W_N, $N = 1, 2, \ldots, N$, und u_ν, v_ν, w_ν, $\nu = 1, 2, \ldots, n$, von denen jedes mit einer der Massen M_N, m_ν

fest verbunden sei, und deren Anfangspunkte in den Schwerpunkten der $M_\varkappa$, m_ν liegen sollen, während die Axen parallel und gleichsinnig denen des Systems x, y, z seien.

Bedeuten dann $C_\varkappa$ und c_ν von den Längen der Fäden, an welchen die Massen $M_\varkappa$ und m_ν hängen, herrührende Constante, so hat man für die $M_\varkappa$:

$$4)\quad \left\{\begin{array}{l} x = U_\varkappa, \\ y = V_\varkappa, \\ z = W_\varkappa + R_\varkappa \varphi + C_\varkappa, \end{array}\right\} \varkappa = 1, 2, \ldots, N;$$

und für die m_ν gelten die Gleichungen:

$$5)\quad \left\{\begin{array}{l} x = u_\nu, \\ y = v_\nu, \\ z = w_\nu - r_\nu \varphi + c_\nu, \end{array}\right\} \nu = 1, 2, \ldots, n.$$

Bezeichnet man die Differentiationen nach der Zeit durch obere Indices, setzt also im Besonderen:

$$\varphi' = \frac{d\varphi}{dt}, \quad \varphi'' = \frac{d^2\varphi}{dt^2},$$

so erhält man durch Differentation der Gleichungen 3) nach der Zeit:

$$\begin{aligned} x' &= 0, \\ y' &= -(\eta \sin\varphi + \zeta \cos\varphi)\,\varphi', \\ &= -z\varphi', \\ z' &= (\eta \cos\varphi - \zeta \sin\varphi)\,\varphi', \\ &= y\varphi'. \end{aligned}$$

Nennt man $d\mu$ das Massenelement der Welle und der starr mit ihr verbundenen Theile, sowie ϱ den Abstand dieses Massenelements von der (geometrischen) Drehaxe, so ist:

$$\varrho^2 d\mu$$

das Trägheitsmoment des Massenelements $d\mu$ in Bezug auf die Drehaxe; mithin ist:

$$J = \int \varrho^2 d\mu$$

das Trägheitsmoment der Axe und der starr mit ihr verbundenen Theile.

Es ist aber:

$$\varrho^2 = \eta^2 + \zeta^2,$$

also hat man auch:

$$J = \int (\eta^2 + \zeta^2)\, d\mu.$$

Digitized by Google

Andererseits erhält man für die lebendige Kraft des Massenelements $d\mu$:

$$\tfrac{1}{2}(x'^2 + y'^2 + z'^2)\, d\mu$$
$$= \tfrac{1}{2}(y^2 + z^2)\, \varphi'^2 d\mu;$$

und weil $y^2 + z^2 = \eta^2 + \zeta^2 = \varrho^2$ ist:

$$= \tfrac{1}{2}\varphi'^2 \varrho^2 d\mu.$$

Also ergiebt sich für die lebendige Kraft der Axe und der starr mit ihr verbundenen Theile:

$$\int \tfrac{1}{2}\varphi'^2 \varrho^2 d\mu = \tfrac{1}{2}\varphi'^2 \int \varrho^2 d\mu = \tfrac{1}{2}\varphi'^2 J.$$

Differentiirt man ferner die Systeme 4) und 5) nach t, so kommt:

$$\left.\begin{aligned} x' &= 0, \\ y' &= 0, \\ z' &= R_N \varphi', \end{aligned}\right\} N = 1, 2, \ldots, N,$$

und:

$$\left.\begin{aligned} x' &= 0, \\ y' &= 0, \\ z' &= - r_\nu \varphi', \end{aligned}\right\} \nu = 1, 2, \ldots, n.$$

Mithin ist für die M_N:

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 = R_N{}^2 \varphi'^2,$$

und dem entsprechend für die m_ν:

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 = r_\nu{}^2 \varphi'^2;$$

also ergiebt sich für die lebendige Kraft der Masse M_N:

$$\tfrac{1}{2} M_N R_N{}^2 \varphi'^2,$$

und für die von m_ν:

$$\tfrac{1}{2} m_\nu r_\nu{}^2 \varphi'^2.$$

Folglich ist die gesammte lebendige Kraft, die lebendige Kraft der Axe und der an ihr hängenden Massen:

$$T = \tfrac{1}{2}\left(J + \sum_1^N {}^N M_N R_N{}^2 + \sum_1^n {}^\nu m_\nu r_\nu{}^2\right)\varphi'^2.$$

Die Kräftefunction $U = U(x, y, z)$ ist so beschaffen, dass:

$$\frac{\partial U}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial U}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial U}{\partial z} = \text{Const.}$$

Da jede Masse M_N zu U den Beitrag zP_N liefert, auch für die

Digitized by Google

m_ν Entsprechendes gilt, erhält man unter Berücksichtigung der dritten Gleichungen der Systeme 4) und 5):

$$U = \left(\sum_1^N {}^{\varkappa} P_\varkappa R_\varkappa - \sum_1^n {}^{\nu} p_\nu r_\nu\right) \varphi + \text{Const.}$$

Die Differentialgleichung des Problems wird bei Anwendung des Hamilton'schen Princips erhalten aus:

$$\delta \int_{t_0}^{t_1} (T + U)\, dt = 0;$$

oder:

$$\delta \int_{t_0}^{t_1} \left[\tfrac{1}{2} \left(J + \sum_1^N {}^{\varkappa} M_\varkappa R_\varkappa^2 + \sum_1^n {}^{\nu} m_\nu r_\nu^2\right) \varphi'^2 + \left(\sum_1^N {}^{\varkappa} P_\varkappa R_\varkappa + \sum_1^n {}^{\nu} p_\nu r_\nu\right) \varphi + \text{Const.}\right] dt = 0.$$

Wenn aber die erste Variation des Integrals:

$$\int_{x_0}^{x_1} f\,(x, y, y')\, dx, \; y' = \frac{dy}{dx}$$

verschwinden soll, in Zeichen:

$$\delta \int_{x_0}^{x_1} f\,(x, y, y')\, dx = 0,$$

so zieht diese Forderung die Differentialgleichung nach sich:

$$\frac{\partial f}{\partial y} - \frac{d}{dx} \frac{\partial f}{\partial y'} = 0.$$

In unserem Falle ist:

$$f = f\,(\varphi, \varphi')$$
$$= T + U; \; \varphi' = \frac{d\varphi}{dt};$$

mithin:

$$\frac{\partial f}{\partial \varphi} = \sum_1^N {}^{\varkappa} P_\varkappa R_\varkappa - \sum_1^n {}^{\nu} p_\nu r_\nu;$$

und:

$$\frac{\partial f}{\partial \varphi'} = \left(J + \sum_1^N {}^{\varkappa} M_\varkappa R_\varkappa^2 + \sum_1^n {}^{\nu} m_\nu r_\nu^2\right) \varphi'.$$

Mithin lautet die gesuchte Differentialgleichung:

Digitized by Google

$$\frac{\partial f}{\partial \varphi} - \frac{d}{dt}\frac{\partial f}{\partial \varphi'} = \sum_1^N {}_\varkappa P_\varkappa R_\varkappa - \sum_1^n {}_\nu p_\nu r_\nu -$$

$$- \left(J + \sum_1^N {}_\varkappa M_\varkappa R_\varkappa^2 + \sum_1^n {}_\nu m_\nu r_\nu^2\right) \varphi'' = 0,$$

oder:

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} = \frac{\left(\sum_1^N {}_\varkappa M_\varkappa R_\varkappa - \sum_1^n {}_\nu m_\nu r_\nu\right) G}{J + \sum_1^N {}_\varkappa M_\varkappa R_\varkappa^2 + \sum_1^n {}_\nu m_\nu r_\nu^2}.$$

Verschwinden hierin alle m_ν und alle $M_\varkappa$ bis auf eins, so erhält man die zur Bestimmung des Trägheitsmoments benutzte Differentialgleichung.

III. Die bei Anwendung der Interpolationsmethode benutzte Formel.

Die Basis der Methoden der Interpolationsrechnung ist die NEWTON'sche Interpolationsformel:

$$f(a + nw) = f(a) + nf'(a + \tfrac{1}{2}) + \frac{n(n-1)}{2!} f''(a + 1) + \\ + \frac{n(n-1)(n-2)}{3!} f'''(a + \tfrac{3}{2}) + \ldots,$$

worin die Factoren der Binomialcoefficienten schon definirt worden sind.

Transformirt man die Formel in eine nach ganzen Potenzen von n fortschreitende, so gewinnt sie die Form:

$$f(a + nw) = f(a) + n(f'(a + \tfrac{1}{2}) - \tfrac{1}{2} f''(a + 1) + \tfrac{1}{3} f'''(a + \tfrac{3}{2}) - \ldots) \\ + \frac{n^2}{2!}(f''(a + 1) - f'''(a + \tfrac{3}{2}) + \ldots.) \\ + \frac{n^3}{3!}(f'''(a + \tfrac{3}{2}) - \ldots) + \ldots..$$

Nun sind zwei Aufgaben zu lösen. Einmal nämlich können bei vorgegebenem Argument die zugehörigen Differentialquotienten gesucht werden; das andere Mal kann der Werth eines Differentialquotienten beliebig hoher Ordnung gegeben vorliegen, und gefragt wird nach der Grösse seines Arguments.

Nur die erste Aufgabe wird in dem citirten Werk (BRÜNNOW, sphärische Astronomie) behandelt, während gerade die zweite es ist, deren Lösung uns zunächst und vorzugsweise interessirt.

Digitized by Google

Wir differentiiren hierzu die nach ganzen Potenzen von n entwickelte NEWTON'sche Formel nach der Veränderlichen n. Dies hat auf der linken Seite der letzten Gleichung dadurch zu geschehen, dass wir vorerst den totalen Differentialquotienten der Function $f(a+nw)$ nach ihrem Argumente $a+nw$ zu bilden und denselben alsdann mit dem partiellen Differentialquotienten des Arguments nach der Veränderlichen n zu multipliciren haben.

Wir erhalten mithin durch einmalige Differentiation:

$$\frac{df(a+nw)}{d(a+nw)}\cdot\frac{\partial(a+nw)}{\partial n}=f'(a+\tfrac{1}{2})-\tfrac{1}{2}f''(a+1)+$$
$$+\tfrac{1}{3}f'''(a+\tfrac{3}{2})-\ldots$$
$$+n(f''(a+1)-f'''(a+\tfrac{3}{2})+\ldots)+$$
$$+\frac{n^2}{2!}(f'''(a+\tfrac{3}{2})-\ldots)+\ldots$$

Bedenken wir, dass $\frac{\partial(a+nw)}{\partial n}=w$ und wiederholen die Differentiation, so kommt:

$$w^2\frac{d^2f(a+nw)}{d(a+nw)^2}=f''(a+1)-f'''(a+\tfrac{3}{2})+\ldots$$
$$+n(f'''(a+\tfrac{3}{2})-\ldots)+\ldots$$

Bezeichnen wir mithin den vorgegebenen Werth des zweiten Differentialquotienten $\frac{d^2f(a+nw)}{d(a+nw)^2}$ allgemein mit $-c$, so erhalten wir das ihm zugehörige Argument $a+nw$ durch Auflösung folgender Bestimmungsgleichung für n nach dieser Unbekannten:

$$cw^2+f''(a+1)-f'''(a+\tfrac{3}{2})+\ldots\ldots+$$
$$+n(f'''(a+\tfrac{3}{2})-\ldots)+\ldots\ldots=0.$$

Der Grad dieser Gleichung für n wird um so höher, je höhere Differenzen in ihr auftreten, d. h. je mehr Punkte man der Bestimmung des zweiten Differentialquotienten zu Grunde legt. Beschränkt man sich auf die Benutzung von nur vier Punkten, der geringstmöglichen Anzahl, so ist die Ordnung der höchsten in der Bestimmungsgleichung für n auftretenden Differenz die dritte und diese Gleichung selbst wird linear. Handelt es sich also um die Bestimmung des Wendepunkts, für welchen $c=0$ wird, so ist die Wurzel jener linearen Gleichung:

$$n=1-\frac{f''(a+1)}{f'''(a+\tfrac{3}{2})}.$$

Die Bestimmung der Argumente höherer Differentialquotienten als des zweiten verläuft, wie leicht ersichtlich, in ähnlicher Weise.

Digitized by Google

IV. Zahlenmaterial einer Reihe von Versuchen.

Die Constante $\varkappa$, der reciproke Werth der auf den Trommelumfang bezogenen Trommelgeschwindigkeit, beträgt 0.0023 $mm^{-1}sec$ mit Ausnahme des erstaufgeführten Versuchs V., wo $\varkappa = 0.0034$ $mm^{-1}sec$ ist.

In den folgenden Tabellen enthält die erste Spalte die Reihe der Abscissenmaasszahlen der Muskelcurve, die zweite die Reihe der zugehörigen Ordinaten, die dritte die der Differenzen je zweier aufeinander folgender Ordinaten, die vierte die Reihe der auf ihre wahre Länge reducirten Ordinaten, sodass die Glieder dieser Spalte das $^3/_4$-fache der entsprechenden, auf derselben Horizontalen befindlichen Glieder der zweiten Spalte darstellen. Die Glieder der letzten Spalte enthalten die um die Ordinatenlänge verminderte Muskellänge, gewähren mithin ein Bild von der Aenderung der Muskellänge mit der Zeit, solange die Ordinaten der Muskelcurve der Zuckungscurve im engeren Sinne angehören und nicht Ordinaten der an die letztere sich schliessenden Parabel sind.

Sämmtliche Längen sind gemessen in mm; nur die hinter »Stab« befindliche eingeklammerte Ziffer bedeutet die angenäherte Stablänge in cm.

»wdh.« bedeutet: wiederholt,	»Anf.-Sp.« bedeutet: Anfangsspannung,
»Ndl.« - : Nadelausschlag,	»Arb.« - : Arbeit.

Es ist indessen zu bemerken, dass die hinter »Anf.-Sp.« stehende Maasszahl die einer Masse ist, nicht die einer Kraft, als welche die Anfangsspannung sich darstellt. Man hat also die angegebene Maasszahl noch mit der Gravitationsconstante $G = 980.6$ cm sec^{-2} zu multipliciren.

Eine ähnliche Bemerkung gilt für jede hinter »Arb.« befindliche Maasszahl.

Von den drei hinter »Max.« stehenden Zahlen bedeutet die erste die Maasszahl der Abscisse des Gipfelpunktes, die zweite die der zugehörigen Ordinate, die dritte, hinter »red.« befindliche die Maasszahl der auf ihre wahre Länge reducirten (mit $^3/_4$ multiplicirten) Ordinate.

Entsprechendes gilt für die hinter »Wdp.« (Wendepunkt) stehenden Maasszahlen.

Sämmtliche Wendepunkte sind hier mit Hilfe der aus $\frac{d^2 S}{d T^2} = 0$ unmittelbar resultirenden Methode der grössten Ordinatendifferenzen bestimmt worden.

Digitized by Google

1. Versuche mit constanter Anfangsspannung und variabelem Trägheitsmoment.

A. Begonnen mit der Reihe der aufsteigenden Trägheitsmomente.

Versuch V. 19/VII. 88 Nachm.

Anf.-Sp. 21.88 g.
Muskellänge 34 mm.
Muskelmasse 2.677 g.

Reihe der aufsteigenden Trägheitsmomente.

Minimalmoment.

Ndl. 8.0.
Max. 16.0; 12.50; red. 9.38.
Wdp. 6.0; 4.70; red. 3.53.

2	0.15	0.70	0.11	33.89
3	0.85	1.20	0.64	33.36
4	2.05	1.30	1.54	32.46
5	3.35	1.35	2.51	31.49
6	4.70	1.35	3.53	30.47
7	6.05	1.30	4.54	29.46
8	7.35	1.25	5.51	28.49
9	8.60	1.10	6.45	27.55
10	9.70		7.28	26.72

Stab (12).

Ndl. 9.5.
Max. 38.5; 23.05; red. 17.29.
Wdp. 8.5; 4.65; red. 3.49.

3	0.20	0.30	0.15	33.85
4	0.50	0.50	0.38	33.62
5	1.00	0.90	0.75	33.25
6	1.90	0.95	1.43	32.47
7	2.85	1.10	2.14	31.86
8	3.95	1.35	2.96	31.04
9	5.30	1.20	3.98	30.02
10	6.50	1.20	4.88	29.12
11	7.70	1.10	5.78	28.22
12	8.80	1.10	6.60	27.40
13	9.90	1.10	7.43	26.47
14	11.00	1.10	8.25	25.75
15	12.10		9.08	24.92

Stab (18).

Ndl. 11.0.
Max. 72.0; 29.40; red. 22.05.
Wdp. 12.0; 6.80; red. 5.10.

5	0.60	0.55	0.45	33.55
6	1.15	0.70	0.86	33.14
7	1.85	0.75	1.39	32.61
8	2.60	1.00	1.95	32.05
9	3.60	1.00	2.70	31.30
10	4.60	1.10	3.45	30.55
11	5.70	1.10	4.28	29.72
12	6.80	1.10	5.10	28.90
13	7.90	1.10	5.93	28.07
14	9.00	1.00	6.75	27.25
15	10.00	1.00	7.50	26.50
16	11.00	1.00	8.25	25.75
17	12.00	1.00	9.00	25.00
18	13.00	1.00	9.75	24.25
19	14.00	1.00	10.50	23.50
20	15.00		11.25	22.75

Stab (18) wdh.

Faden von der Rolle geschleudert. Abkühlung anzeigender Nadelausschlag.

Max. 72.5; 29.0; red. 21.75.
Wdp. 13.5; 7.35; red. 5.51.

5	0.30	0.40	0.23	33.77
6	0.70	0.55	0.53	33.47
7	1.25	0.65	0.94	33.06
8	1.90	0.80	1.43	32.57
9	2.70	1.00	2.03	31.93
10	3.70	1.00	2.78	31.22
11	4.70	1.10	3.53	30.47
12	5.80	1.00	4.35	29.65
13	6.80	1.05	5.10	28.90
14	7.85	1.05	5.89	28.11
15	8.90	1.10	6.68	27.32
16	10.00	1.00	7.50	26.50
17	11.00	0.95	8.25	25.75
18	11.95	0.95	8.96	25.04
19	12.90	0.95	9.68	24.32
20	13.85	0.90	10.39	23.61
21	14.75	0.90	11.06	22.94
22	15.65		11.74	22.26

Stab (18) wdh.

Ndl. 10.5.
Max. 74.0; 26.35; red. 19.76.
Wdp. 15.0; 7.70; red. 5.78.

5	0.20	0.30	0.15	33.85
6	0.50	0.40	0.38	33.62
7	0.90	0.60	0.68	33.32
8	1.50	0.70	1.13	32.87
9	2.20	0.85	1.65	32.35
10	3.05	0.90	2.29	31.71
11	3.95	0.95	2.96	31.04
12	4.90	0.95	3.68	30.32
13	5.85	0.90	4.39	29.61
14	6.75	0.95	5.06	28.94
15	7.70	0.95	5.78	28.22
16	8.65	0.90	6.49	27.51
17	9.55	0.95	7.16	26.84
18	10.50	0.95	7.88	26.12
19	11.45	0.90	8.59	25.41
20	12.35	0.85	9.26	24.74
21	13.20	0.80	9.90	24.10
22	14.00	0.90	10.50	23.50
23	14.90	0.80	11.18	22.82
24	15.70	0.80	11.78	22.22
25	16.50		12.38	21.62

Stab (24).

Ndl. 12.5.
Max. 120.0; 45.00; red. 33.75.
Wdp. 18.5; 6.95; red. 5.21.

10	1.20	0.55	0.90	33.10
11	1.75	0.55	1.31	32.69
12	2.30	0.65	1.73	32.27
13	2.95	0.70	2.21	31.79
14	3.65	0.70	2.74	31.26
15	4.35	0.70	3.26	30.74
16	5.05	0.75	3.79	30.21
17	5.80	0.75	4.35	29.65
18	6.55	0.80	4.91	29.09
19	7.35	0.70	5.51	28.49
20	8.05	0.75	6.04	27.96
21	8.80	0.70	6.60	27.40
22	9.50	0.75	7.13	26.87
23	10.25	0.60	7.69	26.31
24	10.85	0.70	8.14	25.86
25	11.55	0.75	8.66	25.34
26	12.30	0.70	9.23	24.77
27	13.00	0.65	9.75	24.25
28	13.65	0.65	10.24	23.76
29	14.30	0.65	10.73	23.27
30	14.95		11.21	22.79

Stab (32).

Ndl. 11.5.
Max. 172.5; 46.20; red. 34.65.
Wdp. 21.0; 6.10; red. 4.58.

10	0.90	0.30	0.68	33.32
11	1.20	0.35	0.90	33.10
12	1.55	0.35	1.16	32.84
13	1.90	0.45	1.43	32.57
14	2.35	0.50	1.76	32.24
15	2.85	0.50	2.14	31.86
16	3.35	0.55	2.51	31.49
17	3.90	0.55	2.93	31.07
18	4.45	0.55	3.34	30.66
19	5.00	0.55	3.75	30.25
20	5.55	0.55	4.16	29.84
21	6.10	0.55	4.58	29.42
22	6.65	0.55	4.99	29.01

Digitized by Google

23	7.20	0.55	5.40	28.60
24	7.75	0.55	5.81	28.19
25	8.30	0.55	6.23	27.77
26	8.85	0.55	6.64	27.36
27	9.35	0.50	7.01	26.99
28	9.85	0.50	7.39	26.61
29	10.35	0.50	7.76	26.24
30	10.85	0.50	8.14	25.86
31	11.35	0.50	8.51	25.49
32	11.85	0.50	8.89	25.11
33	12.30	0.45	9.23	24.77
34	13.80	0.50	10.35	23.65
35	14.35	0.55	10.76	23.24
36	14.85	0.50	11.14	22.86
37	15.35	0.50	11.51	22.49
38	15.85	0.50	11.89	22.11
39	16.35	0.50	12.26	21.74
40	16.80	0.45	12.60	21.40

Stab (32) wdh.

Ndl. 11.0.
Max. 178.0; 46.45; red. 34.84.
Wdp. 24.0; 7.10; red. 5.33.

10	1.25		0.94	33.06
11	1.55	0.30	1.16	32.84
12	1.85	0.30	1.39	32.61
13	2.15	0.30	1.61	32.39
14	2.50	0.35	1.88	32.12
15	2.85	0.35	2.14	31.86
16	3.25	0.40	2.44	31.56
17	3.70	0.45	2.78	31.22
18	4.15	0.45	3.11	30.89
19	4.60	0.45	3.45	30.55
20	5.10	0.50	3.83	30.17
21	5.60	0.50	4.20	29.80
22	6.10	0.50	4.58	29.42
23	6.60	0.50	4.95	29.05
24	7.10	0.50	5.33	28.67
25	7.60	0.50	5.70	28.30
26	8.05	0.45	6.04	27.96
27	8.55	0.50	6.41	27.49
28	9.05	0.50	6.79	27.21
29	9.55	0.50	7.16	26.84
30	10.00	0.45	7.50	26.50
31	10.45	0.45	7.84	26.16
32	10.90	0.45	8.18	25.82
33	11.35	0.45	8.51	25.49
34	11.80	0.45	8.85	25.15
35	12.25	0.45	9.19	24.81
36	12.70	0.45	9.53	24.47
37	13.15	0.45	9.86	24.14
38	13.60	0.45	10.20	23.80
39	14.05	0.45	10.54	23.46
40	14.50	0.45	10.88	23.12

Stab (40).

Ndl. 9.5.
Max. 212.5; 28.25; red. 21.19.
Wdp. 27.0; 4.30; red. 3.23.

15	1.35		1.01	32.99
16	1.55	0.20	1.16	32.84
17	1.75	0.20	1.31	32.69
18	1.95	0.20	1.46	32.54
19	2.15	0.20	1.61	32.39
20	2.40	0.25	1.80	32.20
21	2.65	0.25	1.99	32.01
22	2.95	0.30	2.21	31.79
23	3.25	0.30	2.44	31.56
24	3.50	0.30	2.63	31.37
25	3.75	0.25	2.81	31.19
26	4.05	0.30	3.04	30.96
27	4.30	0.25	3.23	30.77
28	4.55	0.25	3.41	30.59
29	4.80	0.25	3.60	30.40
30	5.05	0.25	3.79	30.21
31	5.30	0.25	3.98	30.02
32	5.60	0.30	4.20	29.80
33	5.90	0.30	4.43	29.57
34	6.15	0.25	4.61	29.39
35	6.40	0.25	4.80	29.20
36	6.60	0.20	4.95	29.05

Stab (48).

Ndl. 9.0.
Max. 220.0; 21.65; red. 16.24.

Stab (60).

Ndl. 8.5.
Hub 13.90; red. 10.43.

Reihe der absteigenden Trägheitsmomente.

Stab (60).

Ndl. 8.0.
Max. 246.0; 11.80; red. 8.85.

Stab (48).

Ndl. 8.5.
Max. 227.5; 20.50; red. 15.38.

Stab (40).

Ndl. 8.5.
Max. 198.0; 26.90; red. 20.22.
Wdp. 25.0; 3.85; red. 2.89.

10	0.35		0.26	33.74
11	0.50	0.15	0.38	33.62
12	0.70	0.20	0.53	33.47
13	0.90	0.20	0.68	33.32
14	1.10	0.20	0.83	33.17
15	1.30	0.20	0.98	33.02
16	1.50	0.20	1.13	32.87
17	1.75	0.25	1.31	32.69
18	2.00	0.25	1.50	32.50
19	2.25	0.25	1.69	32.31
20	2.50	0.25	1.88	32.12
		0.25		
21	2.75	0.25	2.06	32.94
22	3.00	0.25	2.25	31.75
23	3.30	0.30	2.48	31.52
24	3.60	0.30	2.70	31.30
25	3.85	0.25	2.89	31.11
26	4.10	0.25	3.08	30.92
27	4.40	0.30	3.30	30.70
28	4.65	0.25	3.49	30.51
29	4.95	0.30	3.71	30.29
30	5.25	0.30	3.94	30.06
31	5.50	0.25	4.13	29.87
32	5.75	0.25	4.31	29.69
33	6.00	0.25	4.50	29.50
34	6.25	0.25	4.69	29.31
35	6.45	0.20	4.84	29.16

Stab (32).

Ndl. 9.5.
Max. 154.0; 32.50; red. 24.38.
Wdp. 22.0; 5.00; red. 3.75.

15	2.10		1.58	32.42
16	2.50	0.40	1.88	32.12
17	2.90	0.40	2.18	31.82
18	3.30	0.40	2.48	31.52
19	3.70	0.40	2.78	31.22
20	4.10	0.40	3.08	30.92
21	4.50	0.40	3.38	30.62
22	5.00	0.50	3.75	30.25
23	5.50	0.50	4.13	29.87
24	5.90	0.40	4.43	29.57
25	6.30	0.40	4.73	29.27

Stab (24).

Ndl. 9.0.
Max. 106.0; 33.00; red. 24.75.
Wdp. ?

10	1.00		0.75	33.25
11	1.40	0.40	1.05	32.95
12	1.90	0.50	1.43	32.57
13	2.45	0.55	1.84	32.16
14	3.00	0.55	2.25	31.75
15	3.65	0.65	2.74	31.26
16	4.30	0.65	3.23	30.77
17	4.90	0.60	3.68	30.32
18	5.50	0.60	4.13	29.87
19	6.15	0.65	4.61	29.39
20	6.75	0.60	5.06	28.94
21	7.35	0.60	5.51	28.49
22	7.90	0.55	5.93	28.07
23	8.50	0.60	6.38	27.62
24	9.10	0.60	6.83	27.17
25	9.70	0.60	7.28	26.72

Stab (18).

Ndl. 9.0.
Max. 67.5; 27.45; red. 20.59.
Wdp. 12.5; 4.00; red. 3.00.

Digitized by Google

6	0.25	0.25	0.19	33.81
7	0.50	0.35	0.38	33.62
8	0.85	0.60	0.64	33.36
9	1.45	0.65	1.09	32.91
10	2.10	0.70	1.58	32.42
11	2.80	0.75	2.10	31.90
12	3.55	0.85	2.66	31.34
13	4.40	0.75	3.30	30.70
14	5.15	0.80	3.86	30.14
15	5.95		4.46	29.54

Stab (18) wdh.

Ndl. 8.5.
Max. 64.0.; 27.50; red. 20.63.
Wdp. 14.5; 6.85; red. 5.14.

6	0.80	0.40	0.60	33.40
7	1.20	0.45	0.90	33.10
8	1.65	0.65	1.24	32.76
9	2.30	0.75	1.73	32.27
10	3.05	0.80	2.29	31.71
11	3.85	0.90	2.89	31.11
12	4.75	0.80	3.56	30.44
13	5.55	0.85	4.16	29.84
14	6.40	0.85	4.80	29.20
15	7.25	0.80	5.44	28.56
16	8.05	0.85	6.04	27.96
17	8.90	0.80	6.68	27.32
18	9.70	0.85	7.28	26.72
19	10.55	0.75	7.91	26.09
20	11.30	0.75	8.48	25.52
21	12.05	0.75	9.04	24.96
22	12.80		9.60	24.40

Stab (12).

Ndl. 8.5.
Max. 31.5; 18.00; red. 13.50.
Wdp. 8.0; 3.75; red. 2.81.

5	0.95	0.70	0.71	33.29
6	1.65	0.95	1.24	32.76
7	2.60	1.15	1.95	32.05
8	3.75	1.15	2.81	31.19
9	4.90	1.10	3.68	30.32
10	6.00	1.10	4.50	29.50
11	7.10	1.00	5.33	28.67
12	8.10	1.00	6.08	27.92
13	9.10	0.90	6.83	27.17
14	10.00		7.50	26.50

Minimalmoment.

Ndl. 7.5.
Max. 14.9; 9.85; red. 7.39.

Minimalmoment wdh.

Ndl. 8.0.
Max. 14.9; 9.95; red. 7.46.

Minimalmoment wdh.

Ndl. 7.5.
Max. 14.9; 9.95; red. 7.46.

Minimalmoment wdh.

Ndl. 8.0.
Max. 14.6; 9.70; red. 7.28.

Minimalmoment wdh.

Ndl. 7.0.
Max. 14.2; 9.70; red. 7.28.

Minimalmoment wdh.

Ndl. 7.0.
Max. 13.5; 9.50; red. 7.13.

Versuch XXXII. 12/X. 88 Nachm.

Anf.-Sp. 110.60 g.
Muskellänge 39 mm.
Muskelmasse 4.300 g.

Reihe der aufsteigenden Trägheitsmomente.

Beginn 3 h 19 m.
Schluss 3 h 36 m.

Minimalmoment.

Ndl. 15.0
Max. 24.0; 9.50; red. 7.13.

Stab (18).

Ndl. 16.0.
Max. 38.5; 13.45; red. 10.09.
Wdp. 16.5; 5.20; red. 3.90.

6	0.30	0.25	0.23	38.77
7	0.55	0.30	0.41	38.59
8	0.85	0.35	0.64	38.36
9	1.20	0.35	0.90	38.10
10	1.55	0.55	1.16	37.84
11	2.10	0.50	1.58	37.42
12	2.60	0.50	1.95	37.05
13	3.10	0.60	2.33	36.67
14	3.70	0.50	2.78	36.22
15	4.20	0.65	3.15	35.85
16	4.85	0.65	3.64	35.36
17	5.50	0.65	4.13	34.87
18	6.15	0.55	4.61	34.39
19	6.70	0.65	5.03	33.97
20	7.35	0.60	5.51	33.49
21	7.95	0.55	5.96	33.04
22	8.50	0.60	6.38	32.62
23	9.10	0.50	6.83	32.17
24	9.60	0.50	7.20	31.80
25	10.10		7.58	31.42

Stab (24).

Ndl. 18.0.
Max. 59.5; 17.80; red. 13.35.
Wdp. 20.0; 5.10; red. 3.83.

10	0.65	0.25	0.49	38.51
11	0.90	0.30	0.68	38.32
		0.30		
12	1.20	0.40	0.90	38.10
13	1.60	0.40	1.20	37.80
14	2.00	0.50	1.50	37.50
15	2.50	0.50	1.88	37.12
16	3.00	0.50	2.25	36.75
17	3.50	0.50	2.63	36.37
18	4.00	0.50	3.00	36.00
19	4.50	0.60	3.38	35.62
20	5.10	0.60	3.83	35.17
21	5.70	0.55	4.28	34.72
22	6.25	0.55	4.69	34.31
23	6.80	0.55	5.10	33.90
24	7.35	0.55	5.51	33.49
25	7.90	0.60	5.93	33.07
26	8.50	0.50	6.38	32.62
27	9.00	0.50	6.75	32.25
28	9.50	0.50	7.13	31.87
29	10.00	0.50	7.50	31.50
30	10.50		7.88	31.12

Stab (28).

Faden von der Rolle geschleudert. Abkühlung anzeigender Nadelausschlag.

Max. 76.0; 20.20; red. 15.15.
Wdp. 22.5; 5.20; red. 3.90.

10	0.45	0.15	0.34	38.66
11	0.60	0.30	0.45	38.55
12	0.90	0.30	0.68	38.32
13	1.20	0.30	0.90	38.10
14	1.50	0.30	1.13	37.87
15	1.80	0.40	1.35	37.65
16	2.20	0.40	1.65	37.35
17	2.60	0.40	1.95	37.05
18	3.00	0.45	2.25	36.75
19	3.45	0.45	2.59	36.41
20	3.90	0.50	2.93	36.07
21	4.40	0.55	3.30	35.70
22	4.95	0.50	3.71	35.29
23	5.45	0.55	4.09	34.91
24	6.00	0.50	4.50	34.50
25	6.50	0.50	4.88	34.12
26	7.00	0.50	5.25	33.75
27	7.50	0.50	5.63	33.37
28	8.00	0.50	6.00	33.00
29	8.50	0.50	6.38	32.62
30	9.00	0.50	6.75	32.25
31	9.50	0.50	7.13	31.87
32	10.00	0.45	7.50	31.50
33	10.45	0.45	7.84	31.16
34	10.90	0.45	8.18	30.82
35	11.35		8.51	30.49

Stab (28) wdh.

Ndl. 17.0.
Max. 74.0; 19.65; red. 14.74.
Wdp. 23.0; 5.45; red. 4.09.

Digitized by Google

10	0.40	0.20	0.30	38.70
11	0.60	0.25	0.45	38.55
12	0.85	0.25	0.64	38.36
13	1.10	0.25	0.83	38.17
14	1.35	0.35	1.01	37.99
15	1.70	0.40	1.28	37.72
16	2.10	0.40	1.58	37.42
17	2.50	0.50	1.88	37.12
18	3.00	0.50	2.25	36.75
19	3.50	0.45	2.63	36.37
20	3.95	0.45	2.96	36.04
21	4.40	0.50	3.30	35.70
22	4.90	0.55	3.68	35.32
23	5.45	0.55	4.09	34.91
24	6.00	0.50	4.50	34.50
25	6.50	0.50	4.88	34.12
26	7.00	0.45	5.25	33.75
27	7.45	0.45	5.59	33.41
28	7.90	0.45	5.93	33.07
29	8.35	0.50	6.26	32.74
30	8.85	0.45	6.64	32.36
31	9.30	0.45	6.98	32.02
32	9.75	0.45	7.31	31.69
33	10.20	0.40	7.65	31.35
34	10.60		7.95	31.05

Stab (36).

Ndl. 17.0.
Max. 112.0; 23.00; red. 17.25.
Wdp. 33.0; 7.20; red. 5.40.

10	0.35	0.20	0.26	38.74
12	0.55	0.30	0.41	38.59
14	0.85	0.45	0.64	38.36
16	1.30	0.50	0.98	38.02
18	1.80	0.50	1.35	37.65
20	2.30	0.70	1.73	37.27
22	3.00	0.70	2.25	36.75
24	3.70	0.70	2.78	36.22
26	4.40	0.80	3.30	35.70
28	5.20	0.80	3.90	35.10
30	6.00	0.80	4.50	34.50
32	6.80	0.80	5.10	33.90
34	7.60	0.80	5.70	33.20
36	8.40	0.80	6.30	32.70
38	9.20	0.80	6.90	32.10
40	10.00	0.75	7.50	31.50
42	10.75	0.65	8.06	30.94
44	11.40	0.75	8.55	30.45
46	12.15	0.65	9.11	29.89
48	12.80	0.65	9.60	29.40
50	13.45	0.65	10.09	28.91
52	14.10	0.60	10.58	28.42
54	14.70	0.55	11.03	27.97
56	15.25	0.55	11.44	27.56
58	15.80	0.50	11.85	27.15
60	16.30		12.23	26.77

Stab (48).

Ndl. 16.5.
Max. 148.0; 18.80; red. 14.10.
Wdp. 36.0; 5.00; red. 3.75.

10	0.20	0.15	0.15	38.85
12	0.35	0.20	0.26	38.74
14	0.55	0.20	0.41	38.59
16	0.75	0.25	0.56	38.44
18	1.00	0.30	0.75	38.25
20	1.30	0.35	0.98	38.02
22	1.65	0.45	1.24	37.76
24	2.10	0.45	1.58	37.42
26	2.55	0.45	1.91	37.09
28	3.00	0.50	2.25	36.75
30	3.50	0.50	2.63	36.37
32	4.00	0.50	3.00	36.00
34	4.50	0.50	3.38	35.62
36	5.00	0.50	3.75	35.25
38	5.50	0.50	4.13	34.87
40	6.00	0.50	4.50	34.50
42	6.50	0.50	4.88	34.12
44	7.00	0.45	5.25	33.75
46	7.45	0.45	5.59	33.41
48	7.90	0.45	5.93	33.07
50	8.35	0.45	6.26	32.74
52	8.80	0.50	6.60	32.40
54	9.30	0.45	6.98	32.02
56	9.75	0.45	7.31	31.69
58	10.20	0.40	7.65	31.35
60	10.60		7.95	31.05

Stab (60).

Ndl. 16.0.
Max. 166.5; 11.75; red. 8.81.
Wdp. 45.0; 3.85; red. 2.89.

20	0.55	0.20	0.41	38.59
22	0.75	0.25	0.56	38.44
24	1.00	0.25	0.75	38.25
26	1.25	0.25	0.94	38.06
28	1.50	0.25	1.13	37.87
30	1.75	0.25	1.31	37.69
32	2.00	0.25	1.50	37.50
34	2.25	0.25	1.69	37.31
36	2.50	0.30	1.88	37.12
38	2.80	0.30	2.10	36.90
40	3.10	0.25	2.33	36.67
42	3.35	0.30	2.51	36.49
44	3.65	0.35	2.74	36.26
46	4.00	0.25	3.00	36.00
48	4.25	0.25	3.19	35.81
50	4.50	0.25	3.38	35.62
52	4.75	0.25	3.56	35.44
54	5.00	0.25	3.75	35.25
56	5.25	0.25	3.94	35.06
58	5.50	0.25	4.13	34.87
60	5.75	0.25	4.31	34.69
62	6.00	0.25	4.50	34.50
		0.25		
64	6.25	0.25	4.69	34.31
66	6.50	0.20	4.88	34.12
68	6.70	0.20	5.03	33.97
70	6.90	0.20	5.18	33.82
72	7.10	0.20	5.33	33.67
74	7.30	0.20	5.48	33.52
76	7.50	0.15	5.63	33.37
78	7.65	0.15	5.74	33.26
80	7.80		5.85	33.15

Reihe der absteigenden Trägheitsmomente.

Beginn 3 h 44 m.
Schluss 3 h 56 m.

Stab (60).

Ndl. 16.0.
Max. 169.0; 12.70; red. 9.53.
Wdp. 47.0; 4.25; red. 3.19.

20	0.65	0.15	0.49	38.51
22	0.80	0.20	0.60	38.40
24	1.00	0.25	0.75	38.25
26	1.25	0.25	0.94	38.06
28	1.50	0.25	1.13	37.87
30	1.75	0.30	1.31	37.69
32	2.05	0.30	1.54	37.46
34	2.35	0.25	1.76	37.24
36	2.60	0 30	1.95	37.05
38	2.90	0.30	2.18	36.82
40	3.20	0.30	2.40	36.60
42	3.50	0.25	2.63	36.37
44	3.75	0.30	2.81	36.19
46	4.05	0.35	3.04	35.96
48	4.40	0.30	3.30	35.70
50	4.70	0.30	3.53	35.47
52	5.00	0.25	3.75	35.25
54	5.25	0.25	3.94	35.06
56	5.50	0.25	4.13	34.87
58	5.75	0.25	4.31	34.69
60	6.00	0.25	4.50	34.50
62	6.25	0.25	4.69	34.31
64	6.50	0.25	4.88	34.12
66	6.75	0.25	5.06	33.94
68	7.00	0.20	5.25	33.75
70	7.20		5.40	33.60

Stab (48).

Ndl. 16.5.
Max. 150.0; 18.20; red. 13.65.
Wdp. 34.0; 3.80; red. 2.85.

20	1.00	0.25	0.75	38.25
22	1.25	0.35	0.94	38.06
24	1.60	0.40	1.20	37.80
26	2.00	0.40	1.50	37.50
28	2.40	0.45	1.80	37.20
30	2.85	0.45	2.14	36.86

Digitized by Google

32	3.30	0.45	2.48	36.52
34	3.80	0.50	2.85	36.15
36	4.30	0.50	3.23	35.77
38	4.75	0.45	3.56	35.44
40	5.20	0.45	3.90	35.10
42	5.65	0.45	4.24	34.76
44	6.10	0.45	4.58	34.42
46	6.55	0.45	4.91	34.09
48	7.00	0.45	5.25	33.75
50	7.45	0.45	5.59	33.41
52	7.90	0.45	5.93	33.07
54	8.30	0.40	6.23	32.77
56	8.75	0.45	6.56	32.44
58	9.20	0.45	6.90	32.10
60	9.55	0.35	7.16	31.84

Stab (36).

Ndl. 16.0.
Max. 106.0; 20.50; red. 15.38.
Wdp. 33.0; 6.90; red. 5.17.

10	0.15		0.11	38.89
12	0.35	0.20	0.26	38.74
14	0.70	0.35	0.53	38.47
16	1.10	0.40	0.83	38.17
18	1.60	0.50	1.20	37.80
20	2.20	0.60	1.65	37.35
22	2.80	0.60	2.10	36.90
24	3.55	0.75	2.66	36.34
26	4.20	0.65	3.15	35.85
28	4.90	0.70	3.68	35.32
30	5.70	0.80	4.28	34.72
32	6.45	0.75	4.84	34.16
34	7.30	0.85	5.48	33.52
36	8.00	0.70	6.00	33.00
38	8.70	0.70	6.53	32.47
40	9.40	0.70	7.05	31.95
42	10.10	0.70	7.58	31.42
44	10.75	0.65	8.06	30.94
46	11.40	0.65	8.55	30.45
48	12.00	0.60	9.00	30.00
50	12.60	0.60	9.45	29.55
52	13.20	0.60	9.90	29.10
54	13.70	0.50	10.28	28.72
56	14.20	0.50	10.65	28.35
58	14.70	0.50	11.03	27.97
60	15.20	0.50	11.40	27.60

Stab (36) wdh.

Ndl. 16.0.
Max. 109.0; 20.50; red. 15.38.
Wdp. 33.0; 6.60; red. 4.95.

10	0.25		0.19	38.81
12	0.40	0.15	0.30	38.70
14	0.65	0.25	0.49	38.51
16	1.05	0.40	0.79	38.21
18	1.50	0.45	1.13	37.87
20	2.00	0.50	1.50	37.50
		0.60		

22	2.60	0.60	1.95	37.05
24	3.30	0.70	2.48	36.52
26	4.00	0.70	3.00	36.00
28	4.70	0.70	3.53	35.47
30	5.50	0.80	4.13	34.87
32	6.20	0.70	4.65	34.35
34	7.00	0.80	5.25	33.75
36	7.70	0.70	5.78	33.22
38	8.40	0.70	6.30	32.70
40	9.10	0.70	6.83	32.17
42	9.75	0.65	7.31	31.69
44	10.45	0.70	7.84	31.16
46	11.10	0.65	8.33	30.67
48	11.70	0.60	8.78	30.22
50	12.30	0.60	9.23	29.77

Stab (28).

Ndl. 15.5.
Max. 72.0; 17.85; red. 13.39.
Wdp. 24.0; 5.50; red. 4.13.

10	0.45		0.34	38.66
12	0.75	0.30	0.56	38.44
14	1.30	0.55	0.98	38.02
16	2.00	0.70	1.50	37.50
18	2.70	0.70	2.03	36.97
20	3.60	0.90	2.70	36.30
22	4.50	0.90	3.38	35.62
24	5.50	1.00	4.13	34.87
26	6.50	1.00	4.88	34.12
28	7.40	0.90	5.45	33.55
30	8.30	0.90	6.23	32.77
32	9.20	0.90	6.90	32.10
34	10.00	0.80	7.50	31.50
36	10.80	0.80	8.10	30.90
38	11.60	0.80	8.70	30.30
40	12.40	0.80	9.30	29.70

Stab (24).

Ndl. 14.5.
Max. 56.0; 15.55; red. 11.66.
Wdp. 21.0; 5.60; red. 4.20.

10	0.75		0.56	38.44
11	1.05	0.30	0.79	38.21
12	1.35	0.30	1.01	37.99
13	1.70	0.35	1.28	37.72
14	2.10	0.40	1.58	37.42
15	2.55	0.45	1.91	37.09
16	3.00	0.45	2.25	36.75
17	3.50	0.50	2.63	36.37
18	4.00	0.50	3.00	36.00
19	4.50	0.50	3.38	35.62
20	5.00	0.50	3.75	35.25
21	5.60	0.60	4.20	34.80
22	6.20	0.60	4.65	34.35
23	6.70	0.50	5.03	33.97
24	7.20	0.50	5.40	33.60
25	7.60	0.40	5.70	33.30

Stab (18).

Ndl. 12.5.
Max. 36.5; 12.05; red. 9.04.
Wdp. 15.5; 4.40; red. 3.30.

6	0.35		0.26	38.74
7	0.50	0.15	0.38	38.62
8	0.70	0.20	0.53	38.47
9	1.10	0.40	0.83	38.17
10	1.50	0.40	1.13	37.87
11	2.00	0.50	1.50	37.50
12	2.50	0.50	1.88	37.12
13	3.00	0.50	2.25	36.75
14	3.50	0.50	2.63	36.37
15	4.10	0.60	3.08	35.92
16	4.70	0.60	3.53	35.47
17	5.30	0.60	3.98	35.02
18	5.85	0.55	4.39	34.61
19	6.40	0.55	4.80	34.20
20	6.95	0.55	5.21	33.79

Minimalmoment.

Ndl. 12.0.
Max. 22.5; 8.60; red. 6.45.

Versuch XXXIII. 13/X. 88 Vorm.

Anf.-Sp. 66.42 g.
Muskellänge 40 mm.
Muskelmasse 4.137 g.

Reihe der aufsteigenden Trägheitsmomente.

Minimalmoment.

Ndl. 15.5.
Max. 21.0; 11.55; red. 8.66.
Wdp. 9.0; 4.70; red. 3.53.

3	0.20		0.15	39.85
4	0.80	0.60	0.60	39.40
5	1.45	0.65	1.09	38.91
6	2.35	0.90	1.76	38.24
7	3.15	0.80	2.36	37.64
8	3.90	0.75	2.93	37.07
9	4.70	0.80	3.53	36.47
10	5.50	0.80	4.13	35.87
11	6.40	0.90	4.80	35.20
12	7.30	0.90	5.48	34.52
13	8.20	0.90	6.15	33.85
14	9.00	0.80	6.75	33.25
15	9.70	0.70	7.28	32.72

Stab (24).

Ndl. 18.5.
Max. 71.5; 27.15; red. 20.36.
Wdp. 19.0; 7.30; red. 5.48.

Digitized by Google

10	1.35	1.00	1.01	38.99
12	2.35	1.25	1.76	38.24
14	3.60	1.40	2.70	37.30
16	5.00	1.55	3.75	36.25
18	6.55	1.50	4.91	35.09
20	8.05	1.55	6.04	33.96
22	9.60	1.40	7.20	32.80
24	11.00	1.40	8.25	31.75
26	12.40	1.30	9.30	30.70
28	13.70	1.15	10.28	29.72
30	14.85		11.14	28.86

Stab (28).
Ndl. 19.0.
Max. 126.0; 39.50; red. 29.63.
Wdp. 26.0; 8.50; red. 6.38.

10	0.45	0.55	0.34	39.66
12	1.00	0.70	0.75	39.25
14	1.70	1.00	1.28	38.72
16	2.70	1.05	2.03	37.97
18	3.75	1.10	2.81	37.19
20	4.85	1.25	3.64	36.36
22	6.10	1.20	4.58	35.42
24	7.30	1.20	5.48	34.52
26	8.50	1.25	6.38	33.62
28	9.75	1.25	7.31	32.69
30	11.00	1.20	8.25	31.75
32	12.20	1.15	9.15	30.85
34	13.35	1.15	10.01	29.99
36	14.50	1.15	10.88	29.12
38	15.65	1.10	11.74	28.26
40	16.75		12.56	27.44

Stab (32).
Ndl. 18.0.
Max. 158.0; 40.55; red. 30.41.
Wdp. 31.0; 9.15; red. 6.86.

10	0.10	0.40	0.08	39.92
12	0.50	0.60	0.38	39.62
14	1.10	0.65	0.83	39.17
16	1.75	0.80	1.31	38.69
18	2.55	0.95	1.91	38.09
20	3.50	1.00	2.63	37.37
22	4.50	1.05	3.38	36.62
24	5.55	1.00	4.16	35.84
26	6.55	1.05	4.91	35.09
28	7.60	1.05	5.70	34.30
30	8.65	1.00	6.49	33.51
32	9.65	1.05	7.24	32.76
34	10.70	1.00	8.03	31.97
36	11.70	1.00	8.78	31.22
38	12.70	1.00	9.53	30.47
40	13.70	1.00	10.28	29.72
42	14.70	0.95	11.03	28.97
44	15.65	0.85	11.74	28.26
46	16.50	0.90	12.38	27.62
48	17.40	0.90	13.05	26.95
50	18.30		13.73	26.27

Stab (36).
Ndl. 17.0.
Max. 212.5; 38.00; red. 28.50.
Wdp. 37.0; 7.70; red. 5.78.

16	1.05	0.35	0.79	39.21
18	1.40	0.45	1.05	38.95
20	1.85	0.55	1.39	38.61
22	2.40	0.65	1.80	38.20
24	3.05	0.70	2.29	37.71
26	3.75	0.70	2.81	37.19
28	4.45	0.75	3.34	36.66
30	5.20	0.70	3.90	36.10
32	5.90	0.70	4.43	35.57
34	6.60	0.75	4.95	35.05
36	7.35	0.70	5.51	34.49
38	8.05	0.75	6.04	33.96
40	8.80	0.70	6.60	33.40
42	9.50	0.70	7.13	32.87
44	10.20	0.70	7.65	32.35
46	10.90	0.70	8.18	31.82
48	11.60	0.70	8.70	31.30
50	12.30	0.60	9.23	30.77
52	12.90	0.60	9.68	30.32
54	13.50	0.60	10.13	29.87
56	14.10	0.60	10.58	29.42
58	14.70	0.60	11.03	28.97
60	15.30		11.48	28.52

Stab (48).
Ndl. 16.5.
Max. 256.5; 23.70; red. 17.78.
Wdp. 41.0; 4.60; red. 3.45.

20	0.95	0.25	0.71	39.29
22	1.20	0.25	0.90	39.10
24	1.45	0.35	1.09	38.91
26	1.80	0.35	1.35	38.65
28	2.15	0.35	1.61	38.39
30	2.50	0.35	1.88	38.12
32	2.85	0.35	2.14	37.86
34	3.20	0.40	2.40	37.60
36	3.60	0.40	2.70	37.30
38	4.00	0.40	3.00	37.00
40	4.40	0.40	3.30	36.70
42	4.80	0.40	3.60	36.40
44	5.20	0.40	3.90	36.10
46	5.60	0.40	4.20	35.80
48	6.00	0.35	4.50	35.50
50	6.35	0.35	4.76	35.24
52	6.70	0.35	5.03	34.97
54	7.05	0.30	5.29	34.71
56	7.35	0.35	5.51	34.49
58	7.70	0.35	5.78	34.22
60	8.05	0.30	6.04	33.96
62	8.35	0.35	6.26	33.74
64	8.70	0.30	6.53	33.47
66	9.00	0.30	6.75	33.25
68	9.30	0.30	6.98	33.02
70	9.60		7.20	32.80

Stab (60).
Ndl. 16.0.
Max. 286.0; 12.90; red. 9.68.
Wdp. 47.5; 3.05; red. 2.29.

20	0.60	0.40	0.45	39.55
25	1.00	0.40	0.75	39.25
30	1.40	0.45	1.05	38.95
35	1.85	0.45	1.39	38.61
40	2.30	0.50	1.73	38.27
45	2.80	0.50	2.10	37.90
50	3.30	0.50	2.48	37.52
55	3.80	0.40	2.85	37.15
60	4.20	0.40	3.15	36.85
65	4.60	0.40	3.45	36.55
70	5.00	0.40	3.75	36.25
75	5.40	0.40	4.05	35.95
80	5.80	0.35	4.35	35.65
85	6.15	0.35	4.61	35.39
90	6.50	0.35	4.88	35.12
95	6.85	0.35	5.14	34.86
100	7.20		5.40	34.60

Reihe der absteigenden Trägheitsmomente.

Stab (60).
Ndl. 15.0.
Max. 272.0; 12.00; red. 9.00.
Wdp. 42.5; 2.45; red. 1.84.

20	0.35	0.40	0.26	39.74
25	0.75	0.45	0.56	39.44
30	1.20	0.50	0.90	39.10
35	1.70	0.50	1.38	38.62
40	2.20	0.50	1.65	38.35
45	2.70	0.50	2.03	37.97
50	3.20	0.50	2.40	37.60
55	3.70	0.45	2.78	37.22
60	4.15	0.45	3.11	36.89
65	4.60	0.40	3.45	36.55
70	5.00	0.35	3.75	36.25
75	5.35	0.35	4.01	35.99
80	5.70	0.30	4.28	35.72
85	6.00	0.35	4.50	35.50
90	6.35	0.35	4.76	35.24
95	6.70	0.35	5.03	34.97
100	7.05		5.29	34.71

Stab (48).
Ndl. 16.0.
Max. 244.0; 21.20; red. 15.90.
Wdp. 39.0; 4.25; red. 3.19.

20	1.05	0.30	0.79	39.21
22	1.35	0.30	1.01	38.99
24	1.65	0.35	1.24	38.76
26	2.00	0.35	1.50	38.50
28	2.35	0.30	1.76	38.24
30	2.65	0.35	1.99	38.01

Digitized by Google

32	3.00	0.35	2.25	37.75
34	3.35	0.35	2.51	37.49
36	3.70	0.35	2.78	37.22
38	4.05	0.35	3.04	36.96
40	4.40	0.35	3.30	36.70
42	4.75	0.35	3.56	36.44
44	5.10	0.35	3.83	36.17
46	5.45	0.35	4.09	35.91
48	5.80	0.35	4.35	35.65
50	6.15	0.35	4.61	35.39
52	6.50	0.35	4.88	35.12
54	6.80	0.30	5.10	34.90
56	7.10	0.30	5.33	34.67
58	7.40	0.30	5.55	34.45
60	7.65	0.25	5.74	34.26

Stab (36).

Ndl. 15.0.
Max. 196.5; 32.65; red. 24.49.
Wdp. 37.0; 7.15; red. 5.36.

16	0.80		0.60	39.40
18	1.25	0.45	0.94	39.06
20	1.70	0.45	1.28	38.72
22	2.25	0.55	1.69	38.31
24	2.85	0.60	2.14	37.86
26	3.50	0.65	2.63	37.37
28	4.15	0.65	3.11	36.89
30	4.80	0.65	3.60	36.40
32	5.45	0.65	4.09	35.91
34	6.20	0.75	4.65	35.35
36	6.80	0.60	5.10	34.90
38	7.50	0.70	5.63	34.37
40	8.10	0.60	6.08	33.92
42	8.70	0.60	6.53	33.47
44	9.40	0.70	7.05	32.95
46	10.00	0.60	7.50	32.50
48	10.65	0.65	7.99	32.01
50	11.30	0.65	8.48	31.52
52	11.85	0.55	8.89	31.11
54	12.40	0.55	9.30	30.70
56	12.95	0.55	9.71	30.29
58	13.50	0.55	10.13	29.87
60	14.10	0.60	10.58	29.42
62	14.70	0.60	11.03	28.97
64	15.25	0.55	11.44	28.56
66	15.75	0.50	11.81	28.19
68	16.25	0.50	12.19	27.81
70	16.75	0.50	12.56	27.44

Stab (32).

Ndl. 15.5.
Max. 138.5; 32.40; red. 24.30.
Wdp. 27.0; 6.80; red. 5.10.

10	0.50		0.38	39.62
12	0.85	0.35	0.64	39.36
14	1.25	0.40	0.94	39.06
16	1.90	0.65	1.43	38.57
		0.80		
18	2.70		2.03	37.97
20	3.55	0.85	2.66	37.34
22	4.40	0.85	3.30	36.70
24	5.35	0.95	4.01	35.99
26	6.30	0.95	4.73	35.27
28	7.25	0.95	5.44	34.56
30	8.20	0.95	6.15	33.85
32	9.15	0.95	6.86	33.14
34	10.05	0.90	7.54	32.46
36	10.95	0.90	8.21	31.79
38	11.80	0.85	8.85	31.15
40	12.65	0.85	9.49	30.51
42	13.50	0.85	10.13	29.87
44	14.35	0.85	10.76	29.24
46	15.15	0.80	11.36	28.64
48	15.90	0.75	11.93	28.07
50	16.65	0.75	12.49	27.51

Stab (28).

Ndl. 14.5.
Max. 114.5; 29.65; red. 22.24.
Wdp. 23.0; 6.55; red. 4.91.

10	0.65		0.49	39.51
12	1.25	0.60	0.94	39.06
14	1.95	0.70	1.46	38.54
16	2.75	0.80	2.06	37.94
18	3.80	1.05	2.85	37.15
20	4.85	1.05	3.64	36.36
22	5.95	1.10	4.46	35.54
24	7.15	1.20	5.36	34.64
26	8.25	1.10	6.19	33.81
28	9.30	1.05	6.98	33.02
30	10.35	1.05	7.76	32.24
32	11.35	1.00	8.51	31.49
34	12.35	1.00	9.26	30.74
36	13.35	1.00	10.01	29.99
38	14.30	0.95	10.73	29.27
40	15.25	0.95	11.44	28.56

Stab (24).

Ndl. 14.0.
Max. 67.5; 23.85; red. 17.89.
Wdp. 21.0; 7.05; red. 5.29.

8	0.20		0.15	39.85
10	0.65	0.45	0.49	39.51
12	1.40	0.75	1.05	38.95
14	2.45	1.05	1.84	38.16
16	3.65	1.20	2.74	37.26
18	5.00	1.35	3.75	36.25
20	6.35	1.35	4.76	35.24
22	7.75	1.40	5.81	34.19
24	9.10	1.35	6.83	33.17
26	10.45	1.35	7.84	32.16
28	11.70	1.25	8.78	31.22
30	12.95	1.25	9.71	30.29
32	14.05	1.10	10.54	29.46
34	15.10	1.05	11.33	28.67
		1.05		
36	16.15		12.11	27.89
38	17.05	0.90	12.79	27.21
40	17.95	0.90	13.46	26.54

Minimalmoment.

Ndl. 12.0.
Max. 19.5; 10.00; red. 7.50.
Wdp. 10.0; 4.35; red. 3.26.

4	0.20		0.15	39.85
5	0.50	0.30	0.38	39.62
6	1.20	0.70	0.90	39.10
7	2.00	0.80	1.50	38.50
8	2.80	0.80	2.10	37.90
9	3.55	0.75	2.66	37.34
10	4.35	0.80	3.26	36.74
11	5.10	0.75	3.83	36.17
12	5.90	0.80	4.43	35.57
13	6.70	0.80	5.03	34.97
14	7.50	0.80	5.63	34.37
15	8.20	0.70	6.15	33.85
16	8.85	0.65	6.64	33.36

Versuch XLVI. 2/XI. 88
Vorm. u. Nachm.

Anf.-Sp. 66.42 g.
Muskellänge 39 mm.
Muskelmasse 3.461 g.

Reihe der aufsteigenden Trägheitsmomente.

Vorm.

Beginn 12 h. 2 m.
Schluss 12 h. 36 m.

Minimalmoment.

Ndl. 10.0.
Max. 25.0; 10.70; red. 8.03.

Stab (18).

Ndl. 11.5.
Max. 47.0; 18.20; red. 13.65.
Wdp. 17.5; 6.15; red. 4.61.

7	0.20		0.15	38.85
8	0.50	0.30	0.38	38.62
9	0.85	0.35	0.64	38.36
10	1.35	0.50	1.01	37.99
11	1.90	0.55	1.43	37.57
12	2.50	0.60	1.88	37.12
13	3.05	0.55	2.29	36.71
14	3.70	0.65	2.78	36.22
15	4.40	0.70	3.30	35.70
16	5.10	0.70	3.83	35.17
17	5.80	0.70	4.35	34.65
18	6.50	0.70	4.88	34.12
19	7.20	0.70	5.40	33.60
		0.65		

Digitized by Google

20	7.85	0.65	5.89	33.11
21	8.50	0.65	6.38	32.62
22	9.20	0.70	6.90	32.10
23	9.85	0.65	7.39	31.61
24	10.40	0.55	7.80	31.20
25	11.00	0.60	8.25	30.75

Stab (24).

Ndl. 13.0.
Max. 78.0; 23.70; red. 17.78.
Wdp. 22.0; 6.15; red. 4.61.

10	0.50		0.38	38.62
12	1.20	0.70	0.90	38.10
14	1.90	0.70	1.43	37.57
16	2.80	0.90	2.10	36.90
18	3.80	1.00	2.85	36.15
20	5.00	1.20	3.75	35.25
22	6.15	1.15	4.61	34.39
24	7.30	1.15	5.48	33.52
26	8.45	1.15	6.34	32.66
28	9.55	1.10	7.16	31.84
30	10.60	1.05	7.95	31.05
32	11.65	1.05	8.74	30.26
34	12.60	0.95	9.45	29.55
36	13.60	1.00	10.20	28.80
38	14.60	1.00	10.95	28.05
40	15.55	0.95	11.66	27.34

Stab (28).

Ndl. 16.0.
Max. 112.5; 29.75; red. 22.31.
Wdp. 32.0; 8.60; red. 6.45.

10	0.15		0.11	38.89
12	0.35	0.20	0.26	38.74
14	0.70	0.35	0.53	38.47
16	1.20	0.50	0.90	38.10
18	1.80	0.60	1.35	37.65
20	2.55	0.75	1.91	37.09
22	3.50	0.95	2.63	36.37
24	4.40	0.90	3.30	35.70
26	5.45	1.05	4.09	34.91
28	6.50	1.05	4.88	34.12
30	7.50	1.00	5.63	33.37
32	8.60	1.10	6.45	32.55
34	9.60	1.00	7.20	31.80
36	10.65	1.05	7.99	31.01
38	11.75	1.05	8.81	30.19
40	12.80	1.05	9.60	29.40
42	13.75	0.95	10.31	28.69
44	14.70	0.95	11.03	27.97
46	15.50	0.80	11.63	27.37
48	16.40	0.90	12.30	26.70
50	17.30	0.90	12.98	26.02

Stab (36).

Ndl. 14.5.
Max. 146.0; 36.70; red. 27.53.
Wdp. 35.0; 7.10; red. 5.33.

20	2.00		1.50	37.50
22	2.60	0.60	1.95	37.05
24	3.20	0.60	2.40	36.60
26	3.90	0.70	2.93	36.07
28	4.60	0.70	3.46	35.54
30	5.30	0.70	3.98	35.02
32	6.00	0.70	4.50	34.50
34	6.70	0.70	5.03	33.97
36	7.50	0.80	5.63	33.37
38	8.10	0.60	6.08	32.92
40	8.70	0.60	6.53	32.47
42	9.20	0.50	6.90	32.10
44	9.70	0.50	7.28	31.72
46	10.20	0.50	7.65	31.35
48	10.70	0.50	8.03	30.97
50	11.20	0.50	8.40	30.60

Stab (48).

Ndl. 12.5.
Max. 178.0; 29.50; red. 22.13.
Wdp. 44.0; 5.70; red. 4.28.

20	0.55		0.41	38.59
22	0.80	0.25	0.60	38.40
24	1.10	0.30	0.83	38.17
26	1.40	0.30	1.05	37.95
28	1.75	0.35	1.31	37.69
30	2.15	0.40	1.61	37.39
32	2.60	0.45	1.95	37.05
34	3.05	0.45	2.29	36.81
36	3.60	0.55	2.70	36.30
38	4.05	0.45	3.04	35.96
40	4.60	0.55	3.45	35.55
42	5.10	0.50	3.83	35.17
44	5.70	0.60	4.28	34.72
46	6.20	0.50	4.65	34.35
48	6.75	0.55	5.06	33.94
50	7.25	0.50	5.44	33.56
52	7.80	0.55	5.85	33.15
54	8.25	0.45	6.19	32.81
56	8.80	0.55	6.60	32.40
58	9.30	0.50	6.98	32.02
60	9.80	0.50	7.35	31.65

Stab (48) wdh.

Ndl. 7.0 (?).
Max. 192.0; 20.55; red. 15.41 (?).
Wdp. 43.0; 5.00; red. 3.75.

20	0.70		0.53	38.47
22	0.95	0.25	0.71	38.29
24	1.20	0.25	0.90	38.10
26	1.50	0.30	1.13	37.87
28	1.80	0.30	1.35	37.65
30	2.25	0.45	1.69	37.31
32	2.65	0.40	1.99	37.01
34	3.05	0.40	2.29	36.71
36	3.50	0.45	2.63	36.37
38	3.95	0.45	2.96	36.04
		0.45		
40	4.40	0.45	3.30	35.70
42	4.80	0.40	3.60	35.40
44	5.20	0.40	3.90	35.10
46	5.60	0.40	4.20	34.80
48	6.00	0.40	4.50	34.50
50	6.40	0.40	4.80	34.30
52	6.80	0.40	5.10	33.90
54	7.20	0.40	5.40	33.60
56	7.60	0.40	5.70	33.30
58	8.00	0.40	6.00	33.00
60	8.35	0.35	6.26	32.74

Stab (60).

Ndl. 12.0.
Max. 201.0; 12.40; red. 9.30.
Wdp. 45.0; 3.60; red. 2.70.

20	0.70		0.53	38.47
22	0.85	0.15	0.64	38.36
24	1.00	0.15	0.75	38.25
26	1.20	0.20	0.90	38.10
28	1.45	0.25	1.09	37.91
30	1.70	0.25	1.28	37.72
32	1.95	0.25	1.46	37.54
34	2.20	0.25	1.65	37.35
36	2.45	0.25	1.84	37.16
38	2.70	0.25	2.03	36.97
40	2.95	0.25	2.21	36.79
42	3.20	0.25	2.40	36.60
44	3.45	0.25	2.59	36.41
46	3.70	0.25	2.78	36.22
48	3.95	0.25	2.96	36.04
50	4.20	0.25	3.15	35.85
52	4.45	0.25	3.34	35.76
54	4.70	0.25	3.53	35.47
56	4.90	0.20	3.68	35.32
58	5.10	0.20	3.83	35.17
60	5.30	0.20	3.98	35.02
62	5.55	0.25	4.16	34.84
64	5.80	0.25	4.35	34.65
66	6.00	0.20	4.50	34.50
68	6.20	0.20	4.65	34.35
70	6.40	0.20	4.80	34.20
72	6.60	0.20	4.95	34.05
74	6.80	0.20	5.10	33.90
76	7.00	0.20	5.25	33.75
78	7.20	0.20	5.40	33.60
80	7.40	0.20	5.55	33.45

Stab (80).

Ndl. 11.0.
Max. 224.0; 7.50; red. 5.70.

Reihe der absteigenden Trägheitsmomente.

Nachm.

Beginn 3 h 37 m.
Schluss 4 h 6 m.

Stab (80).

Ndl. 8.0.
Max. 214.0; 4.70; red. 3.53.

Digitized by Google

Stab (60).

Ndl. 8.0.
Max. 169.0; 6.70; red. 5.03.
Wdp. 45.0; 2.30; red. 1.73.

20	0.50	0.05	0.38	38.62
22	0.55	0.10	0.41	38.59
24	0.65	0.10	0.49	38.51
26	0.75	0.15	0.56	38.44
28	0.90	0.20	0.68	38.32
30	1.10	0.20	0.83	38.17
32	1.30	0.10	0.98	38.02
34	1.40	0.20	1.05	37.95
36	1.60	0.15	1.20	37.80
38	1.75	0.15	1.31	37.69
40	1.90	0.15	1.43	37.57
42	2.05	0.15	1.54	37.46
44	2.20	0.15	1.65	37.35
46	2.35	0.15	1.76	37.24
48	2.50	0.15	1.88	37.12
50	2.65	0.10	1.99	37.01
52	2.75	0.10	2.06	36.94
54	2.85	0.10	2.14	36.86
56	2.95	0.15	2.21	36.79
58	3.10	0.15	2.33	36.67
60	3.25	0.15	2.44	36.56
62	3.40	0.15	2.55	36.45
64	3.55	0.10	2.66	36.34
66	3.65	0.10	2.74	36.26
68	3.75	0.10	2.81	36.19
70	3.85		2.89	36.11

Stab (48).

Ndl. 8.5.
Max. 130.0; 8.25; red. 6.19.
Wdp. 39.0; 2.60; red. 1.95.

20	0.60	0.15	0.45	38.55
22	0.75	0.15	0.56	38.44
24	0.90	0.15	0.68	38.32
26	1.05	0.20	0.79	38.21
28	1.25	0.20	0.94	38.06
30	1.45	0.25	1.09	37.91
32	1.70	0.25	1.28	37.72
34	1.95	0.25	1.46	37.54
36	2.20	0.25	1.65	37.35
38	2.45	0.25	1.84	37.16
40	2.70	0.25	2.03	36.97
42	2.95	0.25	2.21	36.79
44	3.20	0.25	2.40	36.60
46	3.45	0.25	2.59	36.41
48	3.70	0.25	2.78	36.22
50	3.95	0.20	2.96	36.04
52	4.15	0.20	3.11	35.89
54	4.35	0.20	3.26	35.74
56	4.55	0.15	3.41	35.59
58	4.70	0.15	3.53	35.47
60	4.85	0.20	3.64	35.36
62	5.05	0.15	3.79	35.21
64	5.20	0.15	3.90	35.10
66	5.35	0.15	4.01	34.99
68	5.50	0.15	4.13	34.87
70	5.65	0.15	4.24	34.76
72	5.80	0.15	4.35	34.65
74	5.95	0.15	4.46	34.54
76	6.10	0.15	4.58	34.42
78	6.25	0.15	4.69	34.31
80	6.40	0.10	4.80	34.20
82	6.50		4.88	34.12

Stab (36).

Ndl. 8.5.
Max. 103.0; 11.00; red. 8.25.
Wdp. 32.0; 3.05; red. 2.29.

20	0.95	0.25	0.71	38.29
22	1.20	0.25	0.90	38.10
24	1.50	0.30	1.13	37.87
26	1.80	0.40	1.35	37.65
28	2.20	0.40	1.65	37.35
30	2.60	0.45	1.95	37.05
32	3.05	0.45	2.29	36.71
34	3.50	0.40	2.63	36.37
36	3.90	0.40	2.93	36.07
38	4.30	0.40	3.23	35.77
40	4.70	0.40	3.53	35.47
42	5.10	0.40	3.83	35.17
44	5.50	0.40	4.13	34.87
46	5.90	0.35	4.43	34.57
48	6.25	0.35	4.69	34.31
50	6.60	0.35	4.95	34.05
52	6.95	0.30	5.21	33.79
54	7.25	0.30	5.44	33.56
56	7.55	0.25	5.66	33.34
58	7.80	0.25	5.85	33.15
60	8.05		6.04	32.96

Stab (32).

Ndl. 7.5.
Max. 85.5; 11.10; red. 8.33.
Wdp. 29.0; 3.65; red. 2.74.

10	0.40	0.15	0.30	38.70
12	0.55	0.15	0.41	38.59
14	0.70	0.25	0.53	38.47
16	0.95	0.35	0.71	38.29
18	1.30	0.35	0.98	38.02
20	1.65	0.35	1.24	37.76
22	2.00	0.40	1.50	37.50
24	2.40	0.50	1.80	37.20
26	2.90	0.50	2.18	36.82
28	3.40	0.50	2.55	36.45
30	3.90	0.50	2.93	36.07
32	4.40	0.50	3.30	35.70
34	4.90	0.45	3.68	35.32
36	5.35	0.45	4.01	34.99
38	5.80	0.45	4.35	34.65
40	6.25	0.40	4.69	34.31
42	6.65	0.45	4.99	34.01
44	7.10	0.40	5.33	33.67
46	7.50	0.35	5.63	33.37
48	7.85	0.35	5.89	33.11
50	8.20		6.15	32.85

Stab (28).

Ndl. 6.5.
Max. 68.0; 10.25; red. 7.69.
Wdp. 28.0; 3.85; red. 2.89.

10	0.25	0.20	0.19	38.81
12	0.45	0.20	0.34	38.66
14	0.65	0.25	0.49	38.51
16	0.90	0.40	0.68	38.32
18	1.30	0.40	0.98	38.02
20	1.70	0.50	1.28	37.72
22	2.20	0.55	1.65	37.35
24	2.75	0.55	2.06	36.94
26	3.30	0.55	2.48	36.52
28	3.85	0.55	2.89	36.11
30	4.40	0.60	3.30	35.70
32	5.00	0.50	3.75	35.25
34	5.50	0.50	4.13	34.87
36	6.00	0.50	4.50	34.50
38	6.50	0.50	4.88	34.12
40	7.00	0.40	5.25	33.75
42	7.40	0.35	5.55	33.45
44	7.75	0.35	5.81	33.19
46	8.10	0.35	6.08	32.92
48	8.45	0.30	6.34	32.66
50	8.75		6.56	32.44

Stab (24).

Ndl. 6.5.
Max. 56.5; 8.85; red. 6.64.
Wdp. 27.00; 4.00; red. 3.00.

10	0.10	0.20	0.08	38.92
12	0.30	0.25	0.23	38.77
14	0.55	0.45	0.41	38.59
16	1.00	0.45	0.75	38.25
18	1.45	0.55	1.09	37.91
20	2.00	0.55	1.50	37.50
22	2.55	0.55	1.91	37.09
24	3.10	0.55	2.33	36.67
26	3.65	0.70	2.74	36.26
28	4.35	0.55	3.26	35.74
30	4.90	0.50	3.68	35.32
32	5.40	0.55	4.05	34.95
34	5.95	0.45	4.46	34.54
36	6.40	0.45	4.80	34.20
38	6.85	0.45	5.14	33.86
40	7.30		5.48	33.52

Stab (18).

Ndl. 6.5.
Max. 32.0; 7.70; red. 5.78.
Wdp. 15.5; 3.50; red. 2.63.

Digitized by Google

6	0.20	0.15	0.15	38.85
7	0.35	0.20	0.26	38.74
8	0.55	0.25	0.41	38.59
9	0.80	0.40	0.60	38.40
10	1.20	0.40	0.90	38.10
11	1.60	0.40	1.20	37.80
12	2.00	0.40	1.50	37.50
13	2.40	0.40	1.80	37.20
14	2.80	0.45	2.10	36.90
15	3.25	0.45	2.44	36.56
16	3.70	0.45	2.78	36.22
17	4.15	0.40	3.11	35.89
18	4.55	0.45	3.41	35.59
19	5.00	0.40	3.75	35.25
20	5.40	0.30	4.05	34.95
21	5.70		4.28	34.72

Minimalmoment.

Ndl. 6.0.
Max. 22.0; 4.65; red. 3.49.

Versuch LVIII. 14/XI. 88 Vorm.

Anf.-Sp. 66.42 g.
Muskellänge 36 mm.
Muskelmasse 3.740 g.

Reihe der aufsteigenden Trägheitsmomente.

Beginn 11 h 27 m.
Schluss 22 h 7 m.

Minimalmoment.

Ndl. 9.0.
Max. 43.5; 12.10; red. 9.08.

Stab (18).

Ndl. 10.5.
Max. 46.0; 10.75; red. 8.06(?).
Wdp. 23.0; 5.00; red. 3.75.

12	0.60	0.65	0.45	35.55
14	1.25	0.75	0.94	35.06
16	2.00	0.80	1.50	34.50
18	2.80	0.85	2.10	33.90
20	3.65	0.90	2.74	33.26
22	4.55	0.90	3.41	32.59
24	5.45	0.90	4.09	31.91
26	6.35	0.75	4.76	31.24
28	7.10		5.33	30.67

Stab (24).

Ndl. 11.0.
Max. 62.0; 14.20; red. 10.65.
Wdp. 23.0; 4.70; red. 3.53.

12	0.80	0.55	0.60	35.40
14	1.35	0.60	1.01	34.99
16	1.95	0.70	1.46	34.54
18	2.65	0.80	1.99	34.01
20	3.45	0.85	2.59	33.41
		0.85		
22	4.30	0.80	3.23	32.77
24	5.10	0.90	3.83	32.17
26	6.00	0.80	4.50	31.50
28	6.80	0.75	5.10	30.90
30	7.55		5.66	30.34

Stab (28).

Ndl. 12.0.
Max. 85.0; 18.20; red. 13.65.
Wdp. 30.0 6.10; red. 4.58.

14	0.60	0.40	0.45	35.55
16	1.00	0.55	0.75	35.25
18	1.55	0.60	1.16	34.84
20	2.15	0.65	1.61	34.39
22	2.80	0.85	2.10	33.90
24	3.65	0.85	2.74	33.26
26	4.50	0.80	3.38	32.62
28	5.30	0.80	3.98	32.02
30	6.10	0.85	4.58	31.42
32	6.95	0.80	5.21	30.79
34	7.75	0.80	5.81	30.19
36	8.55	0.85	6.41	29.59
38	9.40	0.80	7.05	28.95
40	10.20	0.80	7.65	28.35
42	11.00	0.80	8.25	27.75
44	11.80	0.85	8.85	27.15
46	12.65	0.80	9.49	26.51
48	13.45		10.09	25.91

Stab (32).

Ndl. 13.5.
Max. 103.5; 21.45; red. 16.09.
Wdp. 33.0; 7.10; red. 5.33.

14	0.65	0.35	0.49	35.51
16	1.00	0.55	0.75	35.25
18	1.55	0.60	1.16	34.84
20	2.15	0.60	1.61	34.39
22	2.75	0.75	2.06	33.94
24	3.50	0.80	2.63	33.37
26	4.30	0.80	3.23	32.77
28	5.10	0.80	3.83	32.17
30	5.90	0.80	4.43	31.57
32	6.70	0.80	5.03	30.97
34	7.50	0.80	5.63	30.37
36	8.30	0.80	6.23	29.77
38	9.10	0.80	6.83	29.17
40	9.90	0.80	7.43	28.57
42	10.70	0.70	8.03	27.97
44	11.40		8.55	27.45

Stab (32) wdh.

Ndl. 13.5.
Max. 102.0; 20.10; red. 15.08.
Wdp. 32.0; 5.90; red. 4.43.

20	1.55	0.60	1.16	34.84
22	2.15	0.65	1.61	34.39
		0.65		
24	2.80	0.80	2.10	33.90
26	3.60	0.80	2.70	33.30
28	4.40	0.75	3.30	32.70
30	5.15	0.75	3.86	32.14
32	5.90	0.75	4.43	31.57
34	6.65	0.85	4.99	31.01
36	7.50	0.75	5.63	30.37
38	8.25	0.80	6.19	29.81
40	9.05	0.70	6.79	29.21
42	9.75	0.65	7.31	28.69
44	10.40		7.80	28.20

Stab (36).

Ndl. 14.5.
Max. 138.0; 27.25; red. 20.44.
Wdp. 34.5; 7.05; red. 5.29.

20	1.75	0.60	1.31	34.69
22	2.35	0.65	1.76	34.24
24	3.00	0.65	2.25	33.75
26	3.65	0.70	2.74	33.26
28	4.35	0.70	3.26	32.74
30	5.05	0.75	3.79	32.21
32	5.80	0.80	4.35	31.65
34	6.60	0.90	4.95	31.05
36	7.50	0.80	5.63	30.37
38	8.30	0.70	6.23	29.77
40	9.00	0.70	6.75	29.25
42	9.70	0.80	7.31	28.69
44	10.50	0.80	7.88	28.12
46	11.30	0.70	8.48	27.52
48	12.00	0.65	9.00	27.00
50	12.65	0.65	9.49	26.51
52	13.30	0.70	9.98	26.02
54	14.00	0.60	10.50	25.50
56	14.60	0.60	10.95	25.05
58	15.20		11.40	24.60

Stab (40).

Ndl. 13.5.
Max. 151.0; 25.10; red. 18.83(?).
Wdp. 38.0; 6.40; red. 4.80.

20	1.25	0.35	0.94	35.06
22	1.60	0.50	1.20	34.80
24	2.10	0.50	1.58	34.42
26	2.60	0.55	1.95	34.05
28	3.15	0.60	2.36	33.64
30	3.75	0.65	2.81	33.19
32	4.40	0.70	3.30	32.70
34	5.10	0.65	3.83	32.17
36	5.75	0.65	4.31	31.69
38	6.40	0.70	4.80	31.20
40	7.10	0.60	5.33	30.67
42	7.70	0.65	5.78	30.22
44	8.35	0.65	6.26	29.74
46	9.00	0.60	6.75	29.25
48	9.60	0.60	7.20	28.80

Digitized by Google

		0.60		
50	10.20	0.60	7.65	28.35
52	10.80	0.60	8.10	27.90
54	11.40	0.60	8.55	27.45
56	12.00		9.00	27.00

Stab (48).

Ndl. 13.0.
Max. 221.5; 31.25; red. 23.44.
Wdp. 42.0; 6.20; red. 4.65.

20	0.70	0.40	0.53	35.47
22	1.10	0.40	0.83	35.17
24	1.50	0.40	1.13	34.87
26	1.90	0.40	1.43	34.57
28	2.30	0.40	1.73	34.27
30	2.70	0.50	2.03	33.97
32	3.20	0.50	2.40	33.60
34	3.70	0.60	2.78	33.22
36	4.30	0.55	3.23	32.77
38	4.95	0.60	3.71	32.29
40	5.55	0.65	4.16	31.84
42	6.20	0.55	4.65	31.35
44	6.75	0.55	5.03	30.97
46	7.30	0.60	5.48	30.52
48	7.90	0.60	5.93	30.07
50	8.50	0.55	6.38	29.62
52	9.05	0.55	6.79	29.21
54	9.60	0.55	7.20	28.80
56	10.15	0.50	7.61	28.39
58	10.65	0.55	7.99	28.01
60	11.20		8.40	27.60

Stab (60).

Ndl. 12.5.
Max. 276.0; 30.55; red. 22.91.
Wdp. 49.0; 5.45; red. 4.09.

30	1.60	0.35	1.20	34.80
32	1.95	0.40	1.46	34.54
34	2.35	0.35	1.76	34.24
36	2.70	0.40	2.07	33.93
38	3.10	0.40	2.33	33.67
40	3.50	0.45	2.63	33.37
42	3.95	0.40	2.96	33.04
44	4.35	0.45	3.26	32.74
46	4.80	0.45	3.60	32.40
48	5.25	0.40	3.94	32.06
50	5.65	0.45	4.24	31.76
52	6.10	0.45	4.58	31.42
54	6.55	0.40	4.91	31.09
56	6.95	0.45	5.21	30.79
58	7.40	0.40	5.55	30.45
60	7.80	0.40	5.85	30.15
62	8.20	0.40	6.15	29.85
64	8.60	0.40	6.45	29.55
66	9.00		6.75	29.25

Stab (80).

Ndl. 12.0.
Max. 356.0; 20.85; red. 15.64.
Wdp. 55.0; 3.20; red. 2.40.

30	0.75	0.40	0.56	35.44
35	1.15	0.40	0.86	35.14
40	1.55	0.50	1.16	34.84
45	2.05	0.55	1.54	34.46
50	2.60	0.60	1.95	34.05
55	3.20	0.55	2.40	33.60
60	3.75	0.55	2.81	33.19
65	4.30	0.50	3.23	32.77
70	4.80	0.50	3.60	32.40
75	5.30	0.50	3.98	32.02
80	5.80	0.50	4.35	31.65
85	6.30	0.50	4.73	31.27
90	6.80	0.50	5.10	30.90
95	7.30	0.50	5.48	30.52
100	7.80	0.50	5.85	30.15
105	8.30	0.50	6.23	29.77
110	8.80	0.50	6.60	29.40
115	9.30	0.50	6.98	29.02
120	9.80	0.50	7.35	28.65
125	10.30		7.73	28.27

Stab (100).

Ndl. 11.5.
Hub 14.55; red. 10.91.

Stab (122).

Ndl. 11.5.
Hub 10.95; red. 8.21.

Maximalmoment.

Ndl. 11.5.
Hub 2.30; red. 1.73.

Reihe der absteigenden Trägheitsmomente.

Beginn 12 h 21 m.
Schluss 12 h 43 m.

Maximalmoment.

Ndl. 12.0.
Hub 2.35; red. 1.76.

Maximalmoment wdh.

Ndl. 11.5.
Hub 2.40; red. 1.80.

Stab (122).

Ndl. 11.0.
Hub 6.25; red. 4.69.

Stab (100).

Ndl. 10.5.
Hub 10.40; red. 7.80.

Stab (80).

Ndl. 9.5.
Hub 15.10; red. 11.33.

Stab (60).

Ndl. 9.5.
Max. 257.0; 22.15; red. 16.61.
Wdp. 54.0; 4.60; red. 3.45.

30	0.85	0.20	0.64	35.36
32	1.05	0.25	0.79	35.21
34	1.30	0.25	0.98	35.02
36	1.55	0.30	1.16	34.84
38	1.85	0.35	1.39	34.61
40	2.20	0.30	1.65	34.35
42	2.50	0.35	1.88	34.12
44	2.85	0.35	2.14	33.86
46	3.20	0.30	2.40	33.60
48	3.50	0.35	2.63	33.37
50	3.85	0.40	2.89	33.11
52	4.25	0.35	3.19	32.81
54	4.60	0.30	3.45	32.55
56	4.90	0.35	3.68	32.32
58	5.25	0.35	3.94	32.06
60	5.60	0.35	4.20	31.80
62	5.95	0.35	4.46	31.54
64	6.30	0.35	4.73	31.27
66	6.65	0.35	4.99	31.01
68	7.00	0.30	5.25	30.75
70	7.30	0.30	5.48	30.52
72	7.60	0.35	5.70	30.30
74	7.95	0.35	5.96	30.04
76	8.30	0.30	6.23	29.77
78	8.60	0.25	6.45	29.55
80	8.85	0.30	6.64	29.36
82	9.15	0.30	6.86	29.14
84	9.45	0.25	7.09	28.91
86	9.70	0.30	7.28	28.72
88	10.00	0.25	7.50	28.50
90	10.25	0.25	7.69	28.31
92	10.50		7.88	28.12

Stab (48).

Ndl. 9.0.
Max. 184.0; 23.25; red. 17.44.
Wdp. 46.0; 5.70; red. 4.28.

20	0.60	0.20	0.45	35.55
22	0.80	0.25	0.60	35.40
24	1.05	0.25	0.79	35.21
26	1.30	0.35	0.98	35.02
28	1.65	0.35	1.24	34.76
30	2.00	0.40	1.50	34.50
32	2.40	0.40	1.80	34.20
34	2.80	0.45	2.10	33.90
36	3.25	0.45	2.44	33.56
38	3.70	0.50	2.78	33.22
40	4.20	0.50	3.15	32.85
42	4.70	0.50	3.53	32.47
44	5.20	0.50	3.90	32.10
46	5.70	0.50	4.28	31.72
48	6.20	0.50	4.65	31.35
50	6.70	0.50	5.03	30.97

Digitized by Google

52	7.20	0.50	5.40	30.60
54	7.65	0.45	5.74	30.26
56	8.15	0.50	6.11	29.89
58	8.55	0.40	6.41	29.59
60	9.00	0.45	6.75	29.25
62	9.50	0.50	7.13	28.87
64	10.00	0.50	7.50	28.50

Stab (40).

Ndl. 9.0.
Max. 137.0; 20.30; red. 15.23.
Wdp. 39.0; 5.50; red. 4.13.

20	0.70		0.53	35.47
22	1.00	0.30	0.75	35.25
24	1.45	0.45	1.09	34.91
26	1.90	0.45	1.43	34.57
28	2.35	0.45	1.76	34.24
30	2.80	0.45	2.10	33.90
32	3.40	0.60	2.55	33.45
34	4.00	0.60	3.00	33.00
36	4.60	0.60	3.45	32.55
38	5.20	0.60	3.90	32.10
40	5.80	0.60	4.35	31.65
42	6.40	0.60	4.80	31.20
44	7.00	0.60	5.25	30.75
46	7.60	0.60	5.70	30.30
48	8.20	0.60	6.15	29.85
50	8.75	0.55	6.56	29.44
52	9.30	0.55	6.98	29.02

Stab (36).

Ndl. 9.0.
Max. 118.0; 19.10; red. 14.33.
Wdp. 38.0; 6.00; red. 4.50.

20	1.00		0.75	35.25
22	1.35	0.35	1.01	34.99
24	1.85	0.50	1.39	34.61
26	2.35	0.50	1.76	34.24
28	2.85	0.50	2.14	33.86
30	3.40	0.55	2.55	33.45
32	4.00	0.60	3.00	33.00
34	4.65	0.65	3.49	32.51
36	5.35	0.70	4.02	31.98
38	6.00	0.65	4.50	31.50
40	6.65	0.65	4.99	31.01
42	7.30	0.65	5.48	30.52
44	7.95	0.65	5.96	30.04
46	8.55	0.60	6.41	29.59
48	9.10	0.55	6.83	29.17
50	9.65	0.55	7.24	28.76

Stab (32).

Ndl. 8.5.
Max. 82.5; 16.45; red. 12.34.
Wdp. 30.0; 5.55; red. 4.16.

14	0.40		0.30	35.70
16	0.75	0.35	0.56	35.44
18	1.25	0.50	0.94	35.06
20	1.75	0.50	1.31	34.69
22	2.45	0.70	1.84	34.16
24	3.20	0.75	2.40	33.60
26	3.95	0.75	2.96	33.04
28	4.70	0.75	3.53	32.47
30	5.55	0.85	4.16	31.84
32	6.40	0.85	4.80	31.20
34	7.20	0.80	5.40	30.60
36	7.95	0.75	5.96	30.04
38	8.65	0.70	6.49	29.51
40	9.40	0.75	7.05	28.95
42	10.10	0.70	7.58	28.42

Stab (28).

Ndl. 8.0.
Max. 74.0; 13.10; red. 9.83.
Wdp. 33.0; 6.00; red. 4.50.

16	0.50		0.38	35.62
18	0.85	0.35	0.64	35.36
20	1.30	0.45	0.98	35.02
22	2.00	0.70	1.50	34.50
24	2.70	0.70	2.03	33.97
26	3.40	0.70	2.55	33.45
28	4.10	0.70	3.08	32.92
30	4.90	0.80	3.68	32.32
32	5.60	0.70	4.20	31.80
34	6.40	0.80	4.80	31.20
36	7.15	0.75	5.36	30.64
38	7.80	0.65	5.85	30.15
40	8.55	0.75	6.41	29.59
42	9.15	0 60	6.86	29.14
44	9.75	0.60	7.31	28.69
46	10.30	0.55	7.73	28.27

Stab (24).

Ndl. 8.0.
Max. 47.5; 12.10; red. 9.08.
Wdp. 22.0; 5.40; red. 4.05.

10	0.70		0.53	35.47
12	1.20	0.50	0.90	35.10
14	1.90	0.70	1.43	34.57
16	2.75	0.85	2.06	33.94
18	3.60	0.85	2.70	33.30
20	4.50	0.90	3.38	32.62
22	5.40	0.90	4.05	31.95
24	6.30	0.90	4.73	31.27
26	7.20	0.90	5.40	30.60
28	8.00	0.80	6.00	30.00

Stab (18).

Ndl. 8.0.
Max. 36.0; 9.55; red. 7.16.
Wdp. 16.0; 3.90; red. 2.93.

10	1.10		0.83	35.17
12	1.90	0.80	1.43	34.57
14	2.90	1.00	2.18	33.82
16	3.90	1.00	2.93	33.07
18	4.90	1.00	3.68	32.32
20	5.80	0.90	4.35	31.65

Minimalmoment.

Ndl. 7.0.
Max. 32.5; 8.60; red. 6.45.

Versuch LX. 15/XI. 88 Nachm.

Anf.-Sp. 66.12 g.
Muskellänge 37 mm.
Muskelmasse 4.731 g.

Reihe der aufsteigenden Trägheitsmomente.

Beginn 3 h 21 m.
Schluss 3 h 57 m.

Minimalmoment.

Ndl. 13.5.
Max. 44.0; 13.15; red. 9.86.

Stab (18).

Ndl. 15.0.
Max. 51.5; 14.80; red. 11.10.
Wdp. 19.0; 4.50; red. 3.38.

10	0.55		0.41	36.59
12	1.20	0.65	0.90	36.10
14	2.00	0.80	1.50	35.50
16	3.00	1.00	2.25	34.75
18	4.00	1.00	3.00	34.00
20	5.00	1.00	3.75	33.25
22	6.00	1.00	4.50	32.50
24	7.00	1.00	5.25	31.75
26	7.90	0.90	5.93	31.07

(Stab 24).

Ndl. 17.0.
Max. 72.5; 20.25; red. 15.19.
Wdp. 24.0; 6.20; red. 4.65.

10	0.60		0.45	36.55
12	1.05	0.45	0.79	36.21
14	1.70	0.65	1.28	35.72
16	2.40	0.70	1.80	35.20
18	3.30	0.90	2.48	34.52
20	4.20	0.90	3.15	33.85
22	5.20	1.00	3.90	33.10
24	6.20	1.00	4.65	32.35
26	7.20	1.00	5.40	31.60
28	8.20	1.00	6.15	30.85
30	9.15	0.95	6.86	30.14
		0.95		

Digitized by Google

32	10.10	0.95	7.58	29.42
34	11.05	0.95	8.29	28.71
36	12.00	0.95	9.00	27.00
38	12.85	0.85	9.64	26.36
40	13.70	0.85	10.28	25.72

Stab (24) wdh.

Ndl. 17.0.
Max. 72.5; 20.50; red. 15.38.
Wdp. 28.0; 8.00; red. 6.00.

10	0.50		0.38	36.62
12	1.00	0.50	0.75	36.25
14	1.60	0.60	1.20	35.80
16	2.20	0.60	1.65	35.35
18	3.05	0.85	2.29	34.71
20	4.00	0.95	3.00	34.00
22	5.00	1.00	3.75	33.25
24	6.00	1.00	4.50	32.50
26	7.00	1.00	5.25	31.75
28	8.00	1.00	6.00	31.00
30	9.00	1.00	6.75	30.25
32	10.00	1.00	7.50	29.50
34	11.00	1.00	8.25	28.75
36	12.00	1.00	9.00	28.00
38	12.90	0.90	9.68	27.32

Stab (28).

Ndl. 19.0.
Max. 93.0; 25.35; red. 19.01.
Wdp. 28.0; 7.80; red. 5.85.

10	0.50		0.38	36.62
12	0.95	0.45	0.71	36.29
14	1.50	0.55	1.13	35.87
16	2.20	0.70	1.65	35.35
18	3.00	0.80	2.25	34.75
20	3.85	0.85	2.89	34.11
22	4.80	0.95	3.60	33.40
24	5.75	0.95	4.31	32.69
26	6.80	1.05	5.10	31.90
28	7.80	1.00	5.85	31.15
30	8.80	1.00	6.60	30.40
32	9.80	1.00	7.35	29.65
34	10.80	1.00	8.10	28.90
36	11.75	0.95	8.81	28.19
38	12.70	0.95	9.53	27.47
40	13.65	0.95	10.24	26.76
42	14.55	0.90	10.91	26.09
44	15.40	0.85	11.56	25.44
46	16.30	0.90	12.23	24.77
48	17.00	0.70	12.75	24.25

Stab (32).

Ndl. 20.5.
Max. 137.0; 30.00; red. 22.50.
Wdp. 32.0; 8.30; red. 6.23.

14	1.05		0.79	36.21
16	1.55	0.50	1.16	35.84
18	2.15	0.60	1.61	35.39
20	2.80	0.65	2.10	34.90
22	3.65	0.85	2.74	34.26
24	4.50	0.85	3.38	33.62
26	5.40	0.90	4.05	32.95
28	6.40	1.00	4.80	32.20
30	7.35	0.95	5.51	31.49
32	8.30	0.95	6.23	30.77
34	9.30	1.00	6.98	30.02
36	10.30	1.00	7.73	29.27
38	11.30	1.00	8.48	28.52
40	12.25	0.95	9.19	27.81
42	13.15	0.90	9.86	27.14
44	14.00	0.85	10.50	26.50
46	14.90	0.90	11.18	25.82
48	15.70	0.80	11.78	25.22

Stab (36).

Ndl. 22.0.
Max. 146.0; 33.75; red. 25.31.
Wdp. 37.0; 9.50; red. 7.13.

20	2.35		1.76	35.24
22	3.05	0.70	2.29	34.71
24	3.75	0.70	2.81	34.19
26	4.55	0.80	3.41	33.59
28	5.40	0.85	4.05	32.95
30	6.30	0.90	4.73	32.27
32	7.20	0.90	5.40	31.60
34	8.10	0.90	6.08	30.92
36	9.00	0.90	6.75	30.25
38	10.00	1.00	7.50	29.50
40	10.90	0.90	8.18	28.82
42	11.75	0.85	8.81	28.19
44	12.55	0.80	9.41	27.59
46	13.35	0.80	10.01	26.99
48	14.20	0.85	10.65	26.35
50	15.05	0.85	11.29	25.71

Stab (40).

Ndl. 20.5.
Max. 179.0; 37.50; red. 28.13.
Wdp. 40.0; 8.60; red. 6.45.

20	1.50		1.13	35.87
22	2.00	0.50	1.50	35.50
24	2.60	0.60	1.95	35.05
26	3.20	0.60	2.40	34.60
28	3.85	0.65	2.89	34.11
30	4.60	0.75	3.45	33.55
32	5.35	0.75	4.01	32.99
34	6.15	0.80	4.61	32.39
36	7.00	0.85	5.25	31.75
38	7.80	0.80	5.85	31.15
40	8.60	0.80	6.45	30.55
42	9.45	0.85	7.09	29.91
44	10.25	0.80	7.69	29.31
		0.80		

46	11.05	0.80	8.29	28.71
48	11.85	0.80	8.89	28.11
50	12.60	0.75	9.45	27.55
52	13.35	0.75	10.01	26.99
54	14.10	0.75	10.58	26.42
56	14.85	0.75	11.14	25.86
58	15.55	0.70	11.66	25.34
60	16.25	0.70	12.19	24.81

Stab (48).

Ndl. 18.5.
Max. 242.0; 41.20; red. 30.90;
Wdp. 48.0; 9.10; red. 6.83.

20	1.00		0.75	36.25
22	1.30	0.30	0.98	36.02
24	1.70	0.40	1.28	35.72
26	2.20	0.50	1.65	35.35
28	2.75	0.55	2.06	34.94
30	3.25	0.50	2.44	34.56
32	3.75	0.50	2.81	34.19
34	4.40	0.65	3.30	33.70
36	5.00	0.60	3.75	33.25
38	5.65	0.65	4.24	32.76
40	6.40	0.75	4.80	32.20
42	7.10	0.70	5.33	31.67
44	7.75	0.65	5.81	31.19
46	8.40	0.65	6.30	30.70
48	9.10	0.70	6.83	30.17
50	9.70	0.60	7.28	29.72
52	10.40	0.70	7.80	29.20
54	11.10	0.70	8.33	28.67
56	11.80	0.70	8.85	28.15
58	12.45	0.65	9.34	27.66
60	13.15	0.70	9.86	27.14
62	13.75	0.60	10.31	26.69
64	14.40	0.65	10.80	26.20
66	15.00	0.60	11.25	25.75
68	15.60	0.60	11.70	25.30
70	16.20	0.60	12.15	24.85
72	16.75	0.55	12.56	24.44
74	17.40	0.65	13.05	23.95
76	18.00	0.60	13.50	23.50
78	18.50	0.50	13.88	23.12
80	19.00	0.50	14.25	22.75

Stab (60).

Ndl. 16.5.
Max. 328.0; 45.40; red. 34.05.
Wdp. 55.0; 7.55; red. 5.66.

30	1.45		1.09	35.91
32	1.80	0.35	1.35	35.65
34	2.25	0.45	1.69	35.31
36	2.65	0.40	1.99	35.01
38	3.10	0.45	2.33	34.67
40	3.55	0.45	2.66	34.34
42	4.05	0.50	3.04	33.96
		0.50		

44	4.55	0.50	3.41	33.59
46	5.10	0.55	3.83	33.17
48	5.60	0.50	4.20	32.80
50	6.10	0.50	4.58	32.42
52	6.65	0.55	4.99	32.04
54	7.25	0.60	5.44	31.56
56	7.80	0.55	5.85	31.15
58	8.35	0.55	6.26	30.74
60	8.85	0.50	6.64	30.36
62	9.40	0.55	7.05	29.95
64	9.95	0.55	7.46	29.54
66	10.50	0.55	7.88	29.12
68	11.00	0.50	8.25	28.75
70	11.50	0.50	8.63	28.37
72	12.00	0.50	9.00	28.00
74	12.50	0.50	9.38	27.62
76	13.00	0.50	9.75	27.25
78	13.50	0.50	10.13	26.87
80	14.00	0.50	10.50	26.50
82	14.50	0.50	10.88	26.12

Stab (80).
Ndl. 16.0.
Hub 34.30; red. 25.73.

Stab (100).
Ndl. 16.0.
Hub 23.35; red. 17.51.

Stab (122).
Ndl. 15.5.
Hub 13.95; red. 10.46.

Maximalmoment.
Ndl. 14.5.
Hub 4.60; red. 3.45.

Maximalmoment wdh.
Ndl. 14.0.
Hub 4.25; red. 3.19.

Reihe der absteigenden Trägheitsmomente.

Beginn 4 h 10 m.
Schluss 4 h 41 m.

Maximalmoment.
Ndl. 14.0.
Hub 4.20; red. 3.15.

Stab (122).
Ndl. 14.0.
Hub 13.70; red. 10.28.

Stab (100).
Ndl. 14.0.
Hub 20.50; red. 15.38.

Stab (80).
Ndl. 14.5.
Hub 27.50; red. 20.63.

(Stab 60).
Ndl. 14.5.
Max. 316.0; 36.55; red. 27.41.
Wdp. ?.

30	1.30	0.30	0.98	36.02
32	1.60	0.30	1.20	35.80
34	1.90	0.30	1.43	35.57
36	2.20	0.40	1.65	35.35
38	2.60	0.40	1.95	35.05
40	3.00	0.40	2.25	34.75
42	3.40	0.40	2.55	34.45
44	3.80	0.45	2.85	34.15
46	4.25	0.45	3.19	33.81
48	4.70	0.40	3.53	33.47
50	5.10	0.45	3.83	33.17
52	5.55	0.50	4.16	32.84
54	6.05	0.45	4.54	32.46
56	6.50	0.45	4.88	32.12
58	6.95	0.45	5.21	31.79
60	7.40	0.45	5.55	31.45
62	7.85	0.45	5.89	31.11
64	8.30	0.40	6.23	30.77
66	8.70	0.40	6.53	30.47
68	9.10	0.40	6.83	30.17
70	9.50	0.45	7.13	29.87
72	9.95	0.40	7.46	29.54
74	10.35	0.45	7.76	29.24
76	10.80	0.40	8.10	28.90
78	11.20	0.40	8.40	28.60
80	11.60	0.45	8.70	28.30
82	12.05	0.45	9.04	27.96
84	12.50	0.45	9.38	27.62
86	12.95	0.30	9.71	27.29
88	13.25	0.30	9.94	27.06
90	13.55		10.16	26.84

Stab (48).
Ndl. 14.5.
Max. 222.0; 34.15; red. 25.61.
Wdp. 46.0; 7.40; red. 5.55.

20	0.80	0.30	0.60	36.40
22	1.10	0.30	0.83	36.17
24	1.40	0.40	1.05	35.95
26	1.80	0.45	1.35	35.65
28	2.25	0.45	1.69	35.31
30	2.70	0.50	2.03	34.97
32	3.20	0.55	2.40	34.60
34	3.75	0.60	2.81	34.19
36	4.35	0.60	3.26	33.74
38	4.95	0.60	3.71	33.49
40	5.55	0.65	4.16	32.84
42	6.20	0.60	4.65	32.35
44	6.80	0.60	5.10	31.90

46	7.40	0.60	5.55	31.45
48	8.00	0.60	6.00	31.00
50	8.60	0.60	6.45	30.55
52	9.20	0.60	6.90	30.10
54	9.80	0.60	7.35	29.65
56	10.40	0.60	7.80	29.20
58	11.00	0.60	8.25	28.75
60	11.55	0.55	8.66	28.34
62	12.10	0.55	9.08	27.92
64	12.65	0.55	9.49	27.51
66	13.20	0.55	9.90	27.10
68	13.75	0.55	10.31	26.69

Stab (40).
Ndl. 14.5.
Max. 158.0; 28.55; red. 21.42.
Wdp. 40.0; 7.75; red. 5.81.

20	1.40	0.40	1.05	35.95
22	1.80	0.55	1.35	35.65
24	2.35	0.60	1.76	35.24
26	2.95	0.60	2.21	34.79
28	3.55	0.65	2.66	34.34
30	4.20	0.65	3.15	33.85
32	4.85	0.70	3.64	33.36
34	5.55	0.75	4.16	32.84
36	6.30	0.70	4.73	32.27
38	7.00	0.75	5.25	31.75
40	7.75	0.80	5.81	31.19
42	8.55	0.70	6.41	30.59
44	9.25	0.70	6.94	30.06
46	9.95	0.65	7.46	29.54
48	10.60	0.70	7.95	29.05
50	11.30	0.70	8.48	28.52
52	12.00	0.60	9.00	28.00
54	12.60	0.60	9.45	28.55
56	13.20	0.60	9.90	28.10
58	13.80	0.60	10.35	27.65
60	14.40	0.60	10.80	27.20
62	15.00		11.25	26.75

Stab (36).
Ndl. 14.0.
Max. 132.0; 26.05; red. 19.54.
Wdp. 34.0; 6.50; red. 4.88.

14	0.50	0.30	0.38	36.62
16	0.80	0.40	0.60	36.40
18	1.20	0.50	0.90	36.10
20	1.70	0.50	1.28	35.72
22	2.20	0.65	1.65	35.35
24	2.85	0.70	2.14	34.86
26	3.55	0.65	2.66	34.34
28	4.20	0.75	3.15	33.85
30	4.95	0.75	3.71	33.29
32	5.70	0.80	4.28	32.72
34	6.50	0.80	4.88	32.12
36	7.30	0.75	5.48	31.52

Digitized by Google

38	8.05	0.75	6.04	30.94
40	8.80	0.75	6.60	30.40
42	9.55	0.75	7.16	29.84
44	10.30	0.75	7.73	29.27
46	11.00	0.70	8.25	28.75
48	11.70	0.70	8.78	28.22
50	12.40	0.70	9.30	27.70

Stab (32).

Ndl. 13.5.
Max. 104.0; 22.60; red. 16.95.
Wdp. 32.0; 7.00; red. 5.25.

14	1.00		0.75	36.25
16	1.35	0.35	1.01	35.99
18	1.85	0.50	1.39	35.61
20	2.40	0.55	1.80	35.20
22	3.10	0.70	2.33	34.67
24	3.80	0.70	2.85	34.15
26	4.60	0.80	3.45	33.55
28	5.40	0.80	4.05	32.95
30	6.20	0.80	4.65	32.35
32	7.00	0.80	5.25	31.75
34	7.75	0.75	5.81	31.19
36	8.55	0.80	6.41	30.59
38	9.35	0.80	7.01	29.99
40	10.15	0.80	7.61	29.39
42	10.90	0.75	8.18	28.82
44	11.60	0.70	8.70	28.30
46	12.35	0.75	9.26	27.74
48	13.05	0.70	9.79	27.21

Stab (28).

Ndl. 13.0.
Max. 77.50; 18.60; red. 13.95.
Wdp. 24.0; 5.00; red. 3.75.

10	0.40		0.30	36.70
12	0.70	0.30	0.53	36.47
14	1.20	0.50	0.90	36.10
16	1.70	0.50	1.28	35.72
18	2.40	0.70	1.80	35.20
20	3.10	0.70	2.33	34.67
22	4.00	0.90	3.00	34.00
24	5.00	1.00	3.75	33.25
26	6.00	1.00	4.50	32.50
28	6.90	0.90	5.18	31.82

Stab (18).

Ndl. 11.5.
Max. 18.0; 13.50; red. 10.13.
Wdp. 14.0; 5.00; red. 3.75.

6	0.75		0.56	36.44
7	1.15	0.40	0.86	36.14
8	1.55	0.40	1.16	35.84
9	2.05	0.50	1.54	35.46
10	2.65	0.60	1.99	35.01
11	3.20	0.55	2.40	34.60
		0.55		

12	3.75	0.55	2.81	34.19
13	4.40	0.65	3.30	33.70
14	5.00	0.60	3.75	33.25
15	5.55	0.55	4.16	32.84
16	6.10	0.55	4.58	32.42
17	6.70	0.60	5.03	31.97
18	7.25	0.55	5.44	31.56
19	7.80	0.55	5.85	31.15

Minimalmoment.

Ndl. 9.5.
Max. 12.0; 3.80; red. 2.85.

Versuch LXXI. 1/XII. 88
Vorm. u. Nachm.

Anf.-Sp. 66.12 g.
Muskellänge 40 mm.
Muskelmasse 4.401 g.

Reihe der aufsteigenden Trägheitsmomente.

Vorm.
Beginn 12 h 6 m.
Schluss 12 h 34 m.

Minimalmoment.

Ndl. 9.0.
Max. 37.0; 14.05; red. 10.54.

Stab (18).

Ndl. 13.0
Max. 19.0; 17.30; red. 12.98.
Wdp. 18.0; 5.70; red. 4.28.

8	0.65		0.49	39.51
9	1.00	0.35	0.75	39.25
10	1.45	0.45	1.09	38.91
11	1.90	0.45	1.43	38.57
12	2.35	0.45	1.76	38.24
13	2.85	0.50	2.14	37.86
14	3.35	0.50	2.51	37.49
15	3.90	0.55	2.93	37.07
16	4.50	0.60	3.38	36.62
17	5.10	0.60	3.83	36.17
18	5.70	0.60	4.28	35.72
19	6.30	0.60	4.73	35.27
20	6.90	0.60	5.18	34.82
21	7.50	0.60	5.63	34.37
22	8.05	0.55	6.04	33.96
23	8.60	0.55	6.45	33.55
24	9.15	0.55	6.86	33.14
25	9.70	0.55	7.28	32.72
26	10.25	0.55	7.69	32.31
27	10.75	0.50	8.06	31.94
28	11.25	0.50	8.44	31.56
29	11.75	0.50	8.81	31.19
30	12.25	0.50	9.19	30.81

Stab (18) wdh.

Ndl. 13.0.
Max. 18.5; 17.00; red. 12.75.
Wdp. 21.0; 6.80; red. 5.10.

10	0.80		0.60	39.40
11	1.20	0.40	0.90	39.10
12	1.65	0.45	1.24	38.76
13	2.15	0.50	1.61	38.39
14	2.65	0.50	1.99	38.01
15	3.20	0.55	2.40	37.60
16	3.80	0.60	2.85	37.15
17	4.40	0.60	3.30	36.70
18	5.00	0.60	3.75	36.35
19	5.60	0.60	4.20	35.80
20	6.20	0.60	4.65	35.35
21	6.80	0.60	5.10	34.90
22	7.40	0.60	5.55	34.45
23	8.00	0.60	6.00	34.00
24	8.60	0.60	6.45	33.55
25	9.20	0.60	6.90	33.10
26	9.80	0.60	7.35	32.65
27	10.40	0.60	7.80	32.20
28	10.95	0.55	8.21	31.79
29	11.50	0.55	8.63	31.37
30	12.00	0.50	9.00	31.00

Stab (24).

Ndl. 13.0.
Max. 74.5; 22.85; red. 17.14.
Wdp. 27.0; 8.25; red. 6.19.

10	0.30		0.23	39.77
12	0.85	0.55	0.64	39.36
14	1.40	0.55	1.05	38.95
16	2.20	0.80	1.65	38.35
18	3.10	0.90	2.33	37.67
20	4.20	1.10	3.15	36.85
22	5.35	1.15	4.01	35.99
24	6.50	1.15	4.88	35.12
26	7.65	1.15	5.74	34.26
28	8.80	1.15	6.60	33.40
30	9.95	1.15	7.46	32.54
32	11.10	1.15	8.33	31.67
34	12.20	1.10	9.15	30.85
36	13.20	1.00	9.90	30.10
38	14.20	1.00	10.65	29.35
40	15.15	0.95	11.36	28.64

Stab (24) wdh.

Ndl. 15.0.
Max. 74.5; 23.60; red. 17.70.
Wdp. 24.0; 7.45; red. 5.59.

10	0.80		0.60	39.40
12	1.35	0.55	1.01	38.99
14	2.20	0.85	1.65	38.35
16	3.10	0.90	2.33	37.67
18	4.10	1.00	3.08	36.92
		1.10		

20	5.20	1.10	3.90	36.10
22	6.30	1.10	4.73	35.27
24	7.45	1.15	5.59	34.41
26	8.60	1.15	6.45	33.55
28	9.70	1.10	7.28	32.72
30	10.80	1.10	8.10	31.90
32	11.90	1.10	8.93	31.07
34	12.90	1.00	9.68	30.32
36	13.90	1.00	10.43	29.57
38	14.90	1.00	11.18	28.82
40	15.85	0.95	11.89	28.11

Stab (28).

Ndl. 14.5.
Max. 99.5; 27.40; red. 20.55.
Wdp. 30.0; 8.25; red. 6.19.

10	0.20		0.15	39.85
12	0.55	0.35	0.41	39.59
14	1.05	0.55	0.79	39.21
16	1.65	0.60	1.24	38.76
18	2.35	0.70	1.76	38.24
20	3.20	0.85	2.40	37.60
22	4.10	0.90	3.08	36.92
24	5.10	1.00	3.83	36.17
26	6.15	1.05	4.61	35.39
28	7.20	1.05	5.40	34.60
30	8.25	1.05	6.19	33.81
32	9.25	1.00	7.94	32.06
34	10.30	1.05	7.73	32.27
36	11.35	1.05	8.51	31.49
38	12.35	1.00	9.26	30.74
40	13.30	0.95	9.98	30.02
42	14.30	1.00	10.73	29.27
44	15.25	0.95	11.44	28.56
46	16.15	0.90	12.11	27.89
48	17.00	0.85	12.75	27.25
50	17.80	0.80	13.35	26.65

Stab (28) wdh.

Ndl. 14.5.
Max. 99.5; 28.35; red. 21.26.
Wdp. 30.0; 8.80; red. 6.60.

10	0.40		0.30	39.70
12	0.80	0.40	0.60	39.40
14	1.30	0.50	0.98	39.02
16	1.95	0.65	1.46	38.54
18	2.75	0.80	2.06	37.98
20	3.65	0.90	2.74	37.26
22	4.60	0.95	3.45	36.55
24	5.65	1.05	4.24	35.76
26	6.70	1.05	5.03	34.97
28	7.75	1.05	5.81	34.19
30	8.80	1.05	6.60	33.40
32	9.85	1.05	7.39	32.61
34	10.90	1.05	8.18	31.82
36	11.95	1.05	8.96	31.04
		1.05		

38	13.00	1.05	9.75	30.25
40	14.00	1.00	10.50	29.50
42	15.00	1.00	11.25	28.75
44	15.90	0.90	11.93	28.07
46	16.80	0.90	12.60	27.40
48	17.70	0.90	13.28	26.72
50	18.55	0.85	13.91	26.09

Stab (32).

Ndl. 14.5.
Max. 119.0; 31.60; red. 23.70.
Wdp. 34.0; 9.60; red. 7.20.

10	0.35		0.26	39.74
12	0.70	0.35	0.53	39.47
14	1.10	0.40	0.83	39.17
16	1.65	0.55	1.24	38.76
18	2.30	0.65	1.73	38.27
20	3.05	0.75	2.29	37.71
22	3.80	0.75	2.85	37.15
24	4.70	0.90	3.53	36.47
26	5.65	0.95	4.24	35.76
28	6.65	1.00	4.99	35.01
30	7.60	0.95	5.70	34.30
32	8.60	1.00	6.45	33.55
34	9.60	1.00	7.20	32.80
36	10.60	1.00	7.95	32.05
38	11.60	1.00	8.70	31.30
40	12.60	1.00	9.45	30.55
42	13.60	1.00	10.20	29.80
44	14.55	0.95	10.91	29.09
46	15.50	0.95	11.63	28.37
48	16.35	0.85	12.26	27.74
50	17.20	0.85	12.90	27.10

Stab (36).

Ndl. 14.0.
Max. 152.5; 34.10; red. 25.58.
Wdp. 36.0; 8.35; red. 6.26.

16	1.00		0.75	39.25
18	1.40	0.40	1.05	38.95
20	1.95	0.55	1.46	38.54
22	2.55	0.60	1.91	38.09
24	3.30	0.75	2.48	37.52
26	4.05	0.85	3.04	36.96
28	4.80	0.75	3.60	36.40
30	5.65	0.85	4.24	35.76
32	6.55	0.90	4.91	35.09
34	7.45	0.90	5.59	34.41
36	8.35	0.90	6.26	33.74
38	9.25	0.90	6.94	33.06
40	10.15	0.90	7.61	32.39
42	11.05	0.90	8.29	31.71
44	11.90	0.85	8.93	31.07
46	12.75	0.85	9.56	30.44
48	13.60	0.85	10.20	29.80
50	14.45	0.85	10.84	29.16
		0.85		

52	15.30	0.85	11.48	28.52
54	16.05	0.75	12.04	27.96
56	16.75	0.70	12.56	27.44
58	17.50	0.75	13.13	26.87
60	18.20	0.70	13.65	26.35

Stab (40).

Ndl. 13.5.
Max. 179.5; 36.95; red. 27.71.
Wdp. 43.0; 9.00; red. 6.75.

20	1.05		0.79	39.21
22	1.45	0.40	1.09	38.91
24	2.00	0.55	1.50	38.50
26	2.60	0.60	1.95	38.05
28	3.25	0.65	2.44	37.56
30	3.90	0.65	2.93	37.07
32	4.60	0.70	3.45	36.55
34	5.40	0.80	4.05	35.95
36	6.20	0.80	4.65	35.35
38	6.95	0.75	5.21	34.79
40	7.70	0.75	5.78	34.22
42	8.55	0.85	6.41	33.59
44	9.40	0.85	7.05	32.95
46	10.25	0.85	7.69	32.31
48	11.05	0.80	8.29	31.71
50	11.85	0.80	8.93	31.07
52	12.55	0.70	9.41	30.59
54	13.30	0.75	9.98	30.02
56	14.05	0.75	10.54	29.46
58	14.80	0.75	11.10	28.90
60	15.50	0.70	11.63	28.37
62	16.20	0.70	12.15	27.85
64	16.90	0.70	12.68	27.32
66	17.55	0.65	13.16	26.84
68	18.20	0.65	13.65	26.35
70	18.85	0.65	14.14	25.86

Stab (48).

Ndl. 13.5.
Hub 45.50; red. 34.13.
Wdp. 44.5; 7.55; red. 5.66.

20	0.80		0.60	39.40
22	1.15	0.35	0.86	39.14
24	1.50	0.35	1.13	38.87
26	1.90	0.40	1.43	38.57
28	2.35	0.45	1.76	38.24
30	2.85	0.50	2.14	37.86
32	3.40	0.55	2.55	37.45
34	3.95	0.55	2.96	37.04
36	4.60	0.65	3.45	36.55
38	5.25	0.65	3.94	36.06
40	5.90	0.65	4.43	35.57
42	6.55	0.65	4.91	35.09
44	7.20	0.65	5.40	34.60
46	7.90	0.70	5.93	34.07
48	8.55	0.65	6.41	33.59
		0.65		

Digitized by Google

50	9.20	0.65	6.90	33.10
52	9.85	0.65	7.39	32.61
54	10.50	0.65	7.88	32.12
56	11.15	0.65	8.36	31.64
58	11.80	0.65	8.85	31.15
60	12.45	0.65	9.34	30.66
62	13.05	0.60	9.79	30.21
64	13.70	0.65	10.28	29.72
66	14.30	0.60	10.73	29.27
68	14.90	0.60	11.18	28.82
70	15.50	0.60	11.63	28.37
72	16.10	0.60	12.08	27.92
74	16.65	0.55	12.49	27.51
76	17.20	0.55	12.90	27.10
78	17.75	0.55	13.31	26.69
80	18.30	0.55	13.73	26.27
82	18.85	0.55	14.14	25.86
84	19.40	0.55	14.55	25.45
86	19.95	0.55	14.96	25.04
88	20.50	0.55	15.38	24.62
90	21.00	0.50	15.75	24.25

Stab (60).

Ndl. 13.0.
Hub 30.50; red. 22.88.
Wdp. 55.0; 6.70; red. 5.03.

20	0.50		0.38	39.62
22	0.65	0.15	0.49	39.51
24	0.80	0.15	0.60	39.40
26	1.05	0.25	0.79	39.21
28	1.30	0.25	0.98	39.02
30	1.55	0.25	1.16	38.84
32	1.80	0.25	1.35	38.65
34	2.15	0.35	1.61	38.39
36	2.50	0.35	1.88	38.12
38	2.90	0.40	2.18	37.82
40	3.30	0.40	2.48	37.52
42	3.75	0.45	2.81	37.19
44	4.20	0.45	3.15	36.85
46	4.65	0.45	3.49	36.51
48	5.10	0.45	3.83	36.17
50	5.55	0.45	4.16	35.84
52	6.05	0.50	4.54	35.46
54	6.50	0.45	4.88	35.12
56	6.90	0.40	5.18	34.82
58	7.35	0.45	5.51	34.49
60	7.80	0.45	5.85	34.15
62	8.25	0.45	6.19	33.81
64	8.70	0.45	6.53	33.47
66	9.15	0.45	6.86	33.14
68	9.60	0.45	7.20	32.80
70	10.05	0.45	7.54	32.46
72	10.95	0.40	7.84	32.16
74	10.85	0.40	8.14	31.86
76	11.25	0.40	8.44	31.56
78	11.65	0.40	8.74	31.26
80	12.05	0.40	9.04	30.96
		0.40		
82	12.45	0.40	9.34	30.66
84	12.85	0.40	9.64	30.36
86	13.25	0.40	9.94	30.06
88	13.65	0.40	10.24	29.76
90	14.05	0.40	10.54	29.46
92	14.50	0.45	10.88	29.12
94	14.90	0.40	11.18	28.82
96	15.25	0.35	11.44	28.56
98	15.60	0.35	11.70	28.30
100	15.95	0.35	11.96	28.04

Stab (80).

Ndl. 13.0.
Hub 21.80; red. 16.35.

Stab (100).

Ndl. 13.0.
Hub 12.40; red. 9.30.

Stab (122).

Ndl. 12.5.
Hub 8.25; red. 6.19.

Maximalmoment.

Ndl. 12.0.
Hub 4.85; red. 3.64.

Reihe der absteigenden Trägheitsmomente.

Nachm.
Beginn 2 h 46 m.
Schluss 3 h 17 m.

Maximalmoment.

Ndl. 6.0.
Hub 0.85; red. 0.64.

Maximalmoment wdh.

Ndl. 6.0.
Hub 1.05; red. 0.79.

Stab (122).

Ndl. 6.0.
Hub 3.45; red. 2.59.

Stab (100).

Ndl. 6.5.
Hub 4.70; red. 3.53.

Stab (80).

Ndl. 7.0.
Hub 7.05; red. 5.29.

Stab (60).

Ndl. 6.5.
Hub 10.55; red. 7.91.

Stab (48).

Ndl. 6.0.
Max. 149.0; 12.25; red. 9.19.
Wdp. ?.

24	0.40		0.30	39.70
26	0.55	0.15	0.41	39.59
28	0.70	0.15	0.53	39.47
30	0.90	0.20	0.68	39.32
32	1.10	0.20	0.83	39.17
34	1.35	0.25	1.01	38.99
36	1.60	0.25	1.20	38.80
38	1.85	0.25	1.39	38.61
40	2.20	0.35	1.65	38.35
42	2.55	0.35	1.91	38.09
44	2.85	0.35	2.14	37.86
46	3.15	0.30	2.36	37.64
48	3.50	0.35	2.63	37.37
50	3.80	0.30	2.85	37.15
52	4.10	0.30	3.08	36.92
54	4.40	0.30	3.30	36.70
56	4.75	0.35	3.56	36.44
58	5.10	0.35	3.83	36.17
60	5.40	0.30	4.05	35.95
62	5.70	0.30	4.28	35.72
64	6.00	0.30	4.50	35.50
66	6.30	0.30	4.73	35.27
68	6.60	0.30	4.95	35.05
70	6.85	0.25	5.14	34.86
72	7.10	0.25	5.33	34.67
74	7.35	0.25	5.51	34.49
76	7.60	0.25	5.70	34.30
78	7.85	0.25	5.89	34.11
80	8.10	0.25	6.08	33.92
82	8.35	0.25	6.26	33.74
84	8.60	0.25	6.45	33.55
86	8.80	0.20	6.60	33.40
88	9.00	0.20	6.75	33.25
90	9.20	0.20	6.90	33.10

Stab (40).

Ndl. 6.0.
Max. 121.0; 12.35; red. 9.26.
Wdp. 51.0; 5.20; red. 3.90.

20	0.30		0.23	39.77
22	0.45	0.15	0.34	39.66
24	0.60	0.15	0.45	39.55
26	0.80	0.20	0.60	39.40
28	1.00	0.20	0.75	39.25
30	1.30	0.30	0.98	39.02
32	1.60	0.30	1.20	38.80
34	1.90	0.30	1.43	38.57
36	2.20	0.30	1.65	38.35
38	2.60	0.40	1.95	38.05
40	3.00	0.40	2.25	37.75
42	3.40	0.40	2.55	37.45
44	3.75	0.35	2.81	37.19
46	4.15	0.40	3.11	36.89
		0.40		

Digitized by Google

48	4.55	0.40	3.41	36.59
50	4.95	0.40	3.71	36.29
52	5.40	0.45	4.05	35.95
54	5.80	0.40	4.35	35.65
56	6.15	0.35	4.61	35.39
58	6.50	0.35	4.88	35.12
60	6.90	0.30	5.18	34.82
62	7.25	0.35	5.44	34.56
64	7.60	0.35	5.70	34.30
66	7.95	0.35	5.96	34.04
68	8.25	0.30	6.19	33.81
70	8.50	0.25	6.38	33.62
72	8.80	0.30	6.60	33.40
74	9.10	0.30	6.83	33.17
76	9.40	0.30	7.05	32.95
78	9.65	0.25	7.24	32.76
80	9.80	0.15	7.35	32.65

Stab (36).

Ndl. 6.0.
Max. 103.0; 12.30; red. 9.23.
Wdp. 39.0; 3.95; red. 2.96.

20	0.55	0.25	0.41	39.59
22	0.80	0.30	0.60	39.40
24	1.10	0.30	0.83	39.17
26	1.40	0.30	1.05	38.95
28	1.70	0.30	1.28	38.72
30	2.00	0.40	1.50	38.50
32	2.40	0.40	1.80	38.20
34	2.80	0.45	2.10	37.90
36	3.25	0.45	2.44	37.56
38	3.70	0.50	2.78	37.22
40	4.20	0.45	3.15	36.85
42	4.65	0.45	3.49	36.51
44	5.10	0.45	3.83	36.17
46	5.55	0.45	4.16	35.84
48	6.00	0.45	4.50	35.50
50	6.45	0.45	4.84	35.16
52	6.90	0.45	5.18	34.82
54	7.35	0.45	5.51	34.49
56	7.80	0.40	5.85	34.15
58	8.20	0.40	6.15	33.85
60	8.60	0.35	6.45	33.55
62	8.95	0.35	6.71	33.29
64	9.30	0.30	6.98	33.02
66	9.60	0.25	7.20	32.80
68	9.85	0.25	7.39	32.61
70	10.10		7.58	32.42

Stab (32).

Ndl. 6.0.
Max. 89.0; 11.45; red. 8.59.
Wdp. 39.0; 4.35; red. 3.26.

20	0.50	0.30	0.38	39.62
22	0.80	0.30	0.60	39.40
24	1.10	0.35	0.83	39.17
26	1.45	0.35	1.09	38.91

28	1.80	0.35	1.35	38.65
30	2.20	0.40	1.65	38.35
32	2.60	0.40	1.95	38.05
34	3.10	0.50	2.33	37.67
36	3.60	0.50	2.70	37.30
38	4.10	0.50	3.08	36.92
40	4.60	0.50	3.45	36.55
42	5.10	0.50	3.83	36.17
44	5.60	0.50	4.20	35.80
46	6.10	0.50	4.58	35.42
48	6.55	0.45	4.91	35.09
50	7.00	0.45	5.25	34.75
52	7.45	0.45	5.59	34.41
54	7.90	0.45	5.93	34.07
56	8.30	0.40	6.23	33.77
58	8.70	0.40	6.53	33.47
60	9.00	0.30	6.75	33.25
62	9.30	0.30	6.98	33.02
64	9.60	0.30	7.20	32.80
66	9.90	0.30	7.43	32.57
68	10.15	0.25	7.61	32.39
70	10.40	0.25	7.80	32.20

Stab (28).

Ndl. 5.5.
Max. 74.5; 11.10; red. 8.33.
Wdp. 36.0; 4.90; red. 3.68.

16	0.55	0.25	0.41	39.59
18	0.80	0.30	0.60	39.40
20	1.10	0.30	0.83	39.17
22	1.40	0.35	1.05	38.95
24	1.75	0.50	1.31	38.69
26	2.25	0.45	1.69	38.31
28	2.70	0.50	2.03	37.97
30	3.20	0.55	2.40	37.60
32	3.75	0.55	2.81	37.19
34	4.30	0.60	3.23	36.77
36	4.90	0.55	3.68	36.32
38	5.45	0.60	4.09	35.91
40	6.05	0.50	4.54	35.46
42	6.55	0.50	4.91	35.09
44	7.05	0.50	5.29	34.71
46	7.55	0.50	5.66	34.34
48	8.05	0.45	6.04	33.96
50	8.50	0.40	6.38	33.62
52	8.90	0.40	6.68	33.32
54	9.30	0.30	6.98	33.02
56	9.60	0.30	7.20	32.80
58	9.90	0.30	7.43	32.57
60	10.20		7.65	32.35

Stab (24).

Ndl. 5.0.
Max. 64.0; 9.55; red. 7.16.
Wdp. 34.0; 4.70; red. 3.53.

14	0.25	0.20	0.19	39.81
16	0.45	0.25	0.34	39.66

18	0.70	0.25	0.53	39.47
20	0.95	0.25	0.71	39.29
22	1.40	0.45	1.05	38.95
24	1.90	0.50	1.43	38.57
26	2.40	0.50	1.80	38.20
28	2.95	0.55	2.21	37.79
30	3.55	0.60	2.66	37.34
32	4.10	0.55	3.08	36.92
34	4.70	0.60	3.53	36.47
36	5.30	0.60	3.98	36.02
38	5.85	0.55	4.39	35.61
40	6.40	0.55	4.80	35.20
42	6.95	0.55	5.21	34.79
44	7.45	0.50	5.59	34.41
46	7.90	0.45	5.93	34.07
48	8.30	0.40	6.23	33.77
50	8.65	0.35	6.49	33.51

Stab (18).

Ndl. 4.5.
Max. 42.0; 8.10; red. 6.08.
Wdp. 20.0; 3.00; red. 2.25.

10	0.30	0.30	0.23	39.77
12	0.60	0.50	0.45	39.55
14	1.10	0.50	0.83	39.17
16	1.60	0.70	1.20	38.20
18	2.30	0.70	1.73	38.27
20	3.00	0.70	2.25	37.75
22	3.70	0.70	2.78	37.22
24	4.40	0.65	3.30	36.70
26	5.05	0.65	3.79	36.21
28	5.70	0.55	4.28	35.72
30	6.25	0.50	4.69	35.31
32	6.75	0.50	5.06	34.94
34	7.25	0.35	5.44	34.56
36	7.60	0.30	5.70	34.30
38	7.90	0.30	5.93	34.07
40	8.20		6.15	33.85

Minimalmoment.

Ndl. 4.0.
Max. 36.0; 6.75; red. 5.06.
Wdp. 12.5; 1.85; red. 1.39.

6	0.15	0.15	0.11	39.89
7	0.30	0.20	0.23	39.77
8	0.50	0.25	0.38	39.62
9	0.75	0.30	0.56	39.44
10	1.05	0.30	0.83	39.17
11	1.35	0.30	1.04	38.99
12	1.65	0.35	1.24	38.76
13	2.00	0.30	1.50	38.50
14	2.30	0.25	1.73	38.27
15	2.55	0.25	1.91	38.09
16	2.80	0.30	2.10	37.90
17	3.10	0.25	2.33	37.67
18	3.35	0.25	2.51	37.49
19	3.60	0.25	2.70	37.30
20	3.85		2.89	37.11

Digitized by Google

B. Begonnen mit der Reihe der absteigenden Trägheitsmomente.

Versuch XXXIX. 22/X. 88
Vorm. u. Nachm.

Anf.-Sp. 66.42 g.
Muskellänge 36 mm.
Muskelmasse 3.929 g.

Reihe der absteigenden Trägheitsmomente.

Beginn 11 h 20 m.
Schluss 11 h 41 m.

Stab (60).

Ndl. 12.5.
Max. 255.0; 22.10; red. 16.58.
Wdp. 44.0; 4.05; red. 3.04.

20	0.60	0.20	0.45	35.55
22	0.80	0.20	0.60	35.40
24	1.00	0.25	0.75	35.25
26	1.25	0.25	0.94	35.06
28	1.50	0.25	1.13	34.87
30	1.75	0.25	1.31	34.69
32	2.00	0.30	1.50	34.50
34	2.30	0.35	1.73	34.27
36	2.65	0.35	1.99	34.01
38	3.00	0.35	2.25	33.75
40	3.35	0.35	2.51	33.49
42	3.70	0.35	2.78	33.22
44	4.05	0.35	3.04	32.96
46	4.40	0.35	3.30	32.70
48	4.75	0.35	3.56	32.44
50	5.10	0.35	3.83	32.17
52	5.45	0.35	4.09	31.91
54	5.80	0.30	4.35	31.65
56	6.10	0.30	4.58	31.42
58	6.40	0.30	4.80	31.20
60	6.70	0.30	5.03	30.97
62	7.00	0.30	5.25	30.75
64	7.30	0.30	5.48	30.52
66	7.60	0.30	5.70	30.30
68	7.90	0.30	5.93	30.07
70	8.20		6.15	29.85

Stab (48).

Ndl. 14.0.
Max. 226.0; 31.05; red. 23.29.
Wdp. 42.0; 6.35; red. 4.76.

20	1.10	0.35	0.83	35.17
22	1.45	0.40	1.09	34.93
24	1.85	0.45	1.39	34.61
26	2.30	0.45	1.73	34.27
28	2.75	0.45	2.06	33.94
30	3.20	0.45	2.40	33.60
32	3.65	0.55	2.74	33.26
34	4.20	0.55	3.15	32.85
		0.55		
36	4.75	0.55	3.56	32.44
38	5.30	0.55	3.98	32.02
40	5.85	0.50	4.39	31.64
42	6.35	0.55	4.76	31.24
44	6.90	0.60	5.18	30.82
46	7.50	0.50	5.63	30.37
48	8.00	0.55	6.00	30.00
50	8.55	0.55	6.41	29.59
52	9.10	0.50	6.83	29.17
54	9.60	0.50	7.20	28.80
56	10.10	0.50	7.58	28.42
58	10.60	0.50	7.95	28.05
60	11.10	0.50	8.33	27.67
62	11.60	0.50	8.70	27.30
64	12.10	0.50	9.08	26.92
66	12.60	0.45	9.45	26.55
68	13.05	0.45	9.79	26.21
70	13.50		10.13	25.87

Stab (36).

Ndl. 14.0.
Max. 148.0; 31.70; red. 23.78.
Wdp. 32.0; 6.95; red. 5.21.

10	0.50	0.20	0.38	35.62
12	0.70	0.30	0.53	35.47
14	1.00	0.30	0.75	35.25
16	1.30	0.45	0.98	35.02
18	1.75	0.55	1.31	34.69
20	2.30	0.70	1.73	34.27
22	3.00	0.70	2.25	33.75
24	3.70	0.70	2.78	33.22
26	4.40	0.85	3.30	32.70
28	5.25	0.85	3.94	32.06
30	6.10	0.85	4.58	31.42
32	6.95	0.85	5.21	30.79
34	7.80	0.85	5.85	30.15
36	8.65	0.85	6.49	29.51
38	9.50	0.80	7.13	28.87
40	10.30	0.80	7.73	28.27
42	11.10	0.80	8.33	27.67
44	11.90	0.75	8.93	27.07
46	12.65	0.80	9.49	26.51
48	13.45	0.75	10.09	25.91
50	14.20	0.75	10.65	25.35
52	14.95	0.70	11.21	24.79
54	15.65	0.70	11.74	24.26
56	16.35	0.65	12.26	23.74
58	17.00	0.60	12.75	23.25
60	17.60		13.20	22.80

Stab (28).

Ndl. 12.0.
Max. 97.5; 26.05; red. 19.54.
Wdp. 24.0; 6.20; red. 4.65.

10	0.45	0.55	0.34	35.66
12	1.00	0.65	0.75	35.25
14	1.65	0.70	1.24	34.76
16	2.35	0.85	1.76	34.24
18	3.20	0.90	2.40	33.60
20	4.10	1.00	3.08	32.98
22	5.10	1.10	3.83	32.17
24	6.20	1.10	4.65	31.35
26	7.30	0.95	5.48	30.52
28	8.25	0.95	6.19	29.81
30	9.20	1.00	6.90	29.10
32	10.20	1.00	7.65	28.35
34	11.20	0.95	8.40	27.60
36	12.15	0.90	9.11	26.89
38	13.05	0.85	9.79	26.21
40	13.90		10.43	25.57

Stab (28) wdh.

Ndl. 12.0
Max. 97.5; 25.55; red. 19.16.
Wdp. 26.0; 7.10; red. 5.33.

10	0.60	0.55	0.45	35.55
12	1.15	0.55	0.86	35.14
14	1.70	0.70	1.28	34.72
16	2.40	0.80	1.80	34.20
18	3.20	0.90	2.10	33.90
20	4.10	1.00	3.08	32.92
22	5.10	1.00	3.83	32.17
24	6.10	1.00	4.58	31.42
26	7.10	1.00	5.33	30.67
28	8.10	1.00	6.08	29.92
30	9.10	1.00	6.83	29.17
32	10.10	0.90	7.58	28.42
34	11.00	0.90	8.25	27.75
36	11.90	0.90	8.93	27.07
38	12.80	0.90	9.60	26.40
40	13.70		10.28	25.72

Stab (24).

Ndl. 10.5.
Max. 69.5; 20.85; red. 15.64.
Wdp 23.0; 7.15; red. 5.36.

10	0.75	0.65	0.56	35.44
12	1.40	0.85	1.05	34.95
14	2.25	1.00	1.69	34.31
16	3.25	1.05	2.44	33.56
18	4.30	1.10	3.23	32.77
20	5.40	1.15	4.05	31.95
22	6.55	1.15	4.91	31.09
24	7.70	1.15	5.78	30.22
26	8.85	1.10	6.64	29.36
28	9.95	1.00	7.46	28.54
30	10.95		8.21	27.79

Digitized by Google

Stab (18).

Ndl. 10.0.
Max. 43.5; 15.15; red. 11.36.
Wdp. 17.5; 6.10; red. 4.58.

6	0.10	0.30	0.08	35.92
7	0.40	0.35	0.30	35.70
8	0.75	0.45	0.56	35.44
9	1.20	0.45	0.90	35.10
10	1.65	0.55	1.24	34.76
11	2.20	0.60	1.65	34.35
12	2.80	0.60	2.10	33.90
13	3.40	0.60	2.55	33.45
14	4.00	0.60	3.00	33.00
15	4.60	0.60	3.45	32.55
16	5.20	0.60	3.90	32.10
17	5.80	0.60	4.35	31.65
18	6.40	0.60	4.80	31.20
19	7.00	0.60	5.25	30.75
20	7.60	0.60	5.70	30.30
21	8.20	0.60	6.15	29.85
22	8.80	0.60	6.60	29.40
23	9.40	0.60	7.05	28.95
24	10.00	0.50	7.50	28.50
25	10.50		7.88	28.12

Minimalmoment.

Ndl. 8.5.
Max. 28.5; 10.25; red. 7.69.

Reihe der aufsteigenden Trägheitsmomente.

Beginn 2 h 58 m.
Schluss 3 h 19 m.

Minimalmoment.

Ndl. 8.0.
Max. 27.5; 8.25; red. 6.19.

Stab (18).

Ndl. 9.5.
Max. 42.0; 11.25; red. 8.44.
Wdp. 14.5; 2.95; red. 2.21.

8	0.50	0.25	0.38	35.62
9	0.75	0.30	0.56	35.44
10	1.05	0.30	0.79	35.21
11	1.35	0.45	1.01	34.99
12	1.80	0.45	1.35	34.65
13	2.25	0.45	1.69	34.31
14	2.70	0.50	2.03	33.97
15	3.20	0.45	2.40	33.60
16	3.65	0.45	2.74	33.26
17	4.10	0.45	3.08	32.92
18	4.55	0.45	3.41	32.59
19	5.00	0.40	3.75	32.25
20	5.40		4.05	31.95

Stab (24).

Ndl. 9.0.
Max. 64.75; 14.50; red. 10.88.
Wdp. 22.5; 4.55; red. 3.41.

10	0.45	0.25	0.34	35.66
11	0.70	0.25	0.53	35.47
12	0.95	0.25	0.71	35.29
13	1.20	0.25	0.90	35.10
14	1.45	0.25	1.09	34.93
15	1.70	0.25	1.28	34.72
16	1.95	0.35	1.46	34.54
17	2.30	0.40	1.73	34.27
18	2.70	0.40	2.03	33.97
19	3.10	0.40	2.33	33.67
20	3.50	0.40	2.63	33.37
21	3.90	0.40	2.93	33.07
22	4.30	0.50	3.23	32.77
23	4.80	0.40	3.60	32.40
24	5.20	0.40	3.90	32.10
25	5.60	0.40	4.20	31.80
26	6.00	0.40	4.50	31.50
27	6.40	0.40	4.80	31.30
28	6.80	0.40	5.10	30.90
29	7.20	0.40	5.40	30.60
30	7.60	0.40	5.70	30.30
31	8.00	0.40	6.00	30.00
32	8.40	0.40	6.30	29.70
33	8.80	0.35	6.60	29.40
34	9.15	0.30	6.86	29.14
35	9.45		7.09	28.91

Stab (28).

Ndl. 8.5.
Max. 82.0; 16.20; red. 12.15.
Wdp. 29.0; 5.65; red. 4.24.

10	0.20	0.20	0.15	35.85
12	0.40	0.40	0.30	35.70
14	0.80	0.40	0.60	35.40
16	1.20	0.55	0.90	35.10
18	1.75	0.55	1.31	34.69
20	2.30	0.70	1.73	34.27
22	3.00	0.70	2.25	33.75
24	3.70	0.80	2.78	33.22
26	4.50	0.75	3.38	32.62
28	5.25	0.75	3.94	32.06
30	6.00	0.75	4.50	31.50
32	6.75	0.70	5.06	30.94
34	7.45	0.75	5.59	30.41
36	8.20	0.70	6.15	29.85
38	8.90	0.65	6.68	29.32
40	9.55	0.65	7.16	28.84
42	10.20	0.60	7.65	28.35
44	10.80	0.55	8.10	27.90
46	11.35	0.55	8.51	27.49
48	11.90	0.55	8.93	27.07
50	12.45		9.34	26.66

Stab (36).

Ndl. 8.5.
Max. 115.0; 17.70; red. 13.28.
Wdp. 37.0; 6.00; red. 4.50.

10	0.05	0.15	0.04	39.96
12	0.20	0.15	0.15	39.85
14	0.35	0.20	0.26	39.74
16	0.55	0.35	0.41	39.59
18	0.90	0.40	0.68	35.32
20	1.30	0.50	0.98	35.02
22	1.80	0.50	1.35	34.65
24	2.30	0.50	1.73	34.27
26	2.80	0.55	2.10	33.90
28	3.35	0.55	2.51	33.49
30	3.90	0.60	2.93	33.07
32	4.50	0.60	3.38	32.62
34	5.10	0.60	3.83	32.17
36	5.70	0.60	4.28	31.72
38	6.30	0.60	4.73	31.27
40	6.90	0.60	5.18	30.82
42	7.50	0.60	5.63	30.37
44	8.10	0.55	6.08	29.92
46	8.65	0.55	6.49	29.51
48	9.20	0.50	6.90	29.10
50	9.70		7.28	28.72

Stab (48).

Ndl. 8.0.
Max. 160.0; 13.75; red. 10.31.
Wdp. 40.0; 3.40; red. 2.55.

20	0.45	0.25	0.34	35.66
22	0.70	0.25	0.53	35.47
24	0.95	0.25	0.71	35.29
26	1.20	0.25	0.90	35.10
28	1.45	0.25	1.09	34.91
30	1.70	0.30	1.28	34.72
32	2.00	0.35	1.50	34.50
34	2.35	0.40	1.76	34.24
36	2.75	0.35	2.06	33.94
38	3.10	0.30	2.33	33.67
40	3.40	0.35	2.55	33.45
42	3.75	0.35	2.81	33.19
44	4.10	0.40	3.08	32.92
46	4.50	0.30	3.38	32.62
48	4.80	0.40	3.60	32.40
50	5.20	0.30	3.90	32.10
52	5.50	0.30	4.13	31.87
54	5.80	0.40	4.35	31.65
56	6.20	0.35	4.65	31.35
58	6.55	0.20	4.91	31.09
60	6.75		5.06	30.94

Stab (60).

Ndl. 7.5.
Max. 178.0; 8.95; red. 6.71.
Wdp. 42.0; 2.00; red. 1.50.

20	0.20		0.15	35.85
22	0.30	0.10	0.23	35.77
24	0.40	0.10	0.30	35.60
26	0.55	0.15	0.41	35.59
28	0.70	0.15	0.53	35.47
30	0.85	0.15	0.64	35.34
32	1.00	0.15	0.75	35.25
34	1.20	0.20	0.90	35.10
36	1.40	0.20	1.05	34.95
38	1.60	0.20	1.20	34.80
40	1.80	0.20	1.35	34.65
42	2.00	0.20	1.50	34.50
44	2.20	0.20	1.65	34.35
46	2.40	0.20	1.80	34.20
48	2.60	0.20	1.95	34.05
50	2.80	0.20	2.10	33.90
52	3.00	0.20	2.25	33.75
54	3.20	0.20	2.40	33.60
56	3.40	0.20	2.55	33.45
58	3.60	0.20	2.70	33.30
60	3.75	0.15	2.81	33.19
62	3.90	0.15	2.93	33.07
64	4.10	0.20	3.08	32.92
66	4.25	0.15	3.19	32.81
68	4.40	0.15	3.30	32.70
70	4.55	0.15	3.41	32.59

— —

Versuch XLII. 26/X. 88 Vorm.

Anf.-Sp. 66.42 g.
Muskellänge 37 mm.
Muskelmasse 3.755 g.

Reihe der absteigenden Trägheitsmomente.

Beginn 11 h 26 m.
Schluss 12 h 0 m.

Stab (60).

Ndl. 12.0.
Max. 270.0; 24.85; red. 18.64.
Wdp. 42.0; 3.90; red. 2.93.

20	0.75		0.56	36.44
22	0.90	0.15	0.68	36.32
24	1.10	0.20	0.83	36.17
26	1.30	0.20	0.98	36.02
28	1.60	0.30	1.20	35.80
30	1.90	0.30	1.43	35.57
32	2.20	0.30	1.65	35.35
34	2.50	0.30	1.88	35.12
36	2.80	0.30	2.10	34.90
38	3.15	0.35	2.36	34.64
40	3.50	0.35	2.63	34.37
42	3.90	0.40	2.93	34.07
44	4.30	0.40	3.23	33.77
46	4.65	0.35	3.49	33.51
		0.35		

48	5.00	0.35	3.75	33.25
50	5.35	0.35	4.01	32.99
52	5.70	0.35	4.28	32.72
54	6.05	0.35	4.64	32.36
56	6.40	0.35	4.80	32.20
58	6.75	0.35	5.06	31.94
60	7.10	0.35	5.33	31.67
62	7.40	0.30	5.55	31.45
64	7.75	0.35	5.81	31.19
66	8.05	0.30	6.04	30.96
68	8.40	0.35	6.30	30.70
70	8.70	0.30	6.53	30.47

Stab (48).

Ndl. 14.0.
Max. 234.0; 32.60; red. 24.45.
Wdp. 39.0; 5.80; red. 4.35.

20	1.00		0.75	36.25
22	1.40	0.40	1.05	35.95
24	1.85	0.45	1.39	35.61
26	2.30	0.45	1.73	35.27
28	2.75	0.45	2.06	34.94
30	3.20	0.45	2.40	34.60
32	3.75	0.55	2.81	34.19
34	4.35	0.60	3.26	33.74
36	4.90	0.55	3.68	33.32
38	5.50	0.60	4.13	32.87
40	6.10	0.60	4.58	32.42
42	6.65	0.55	4.99	32.01
44	7.20	0.55	5.40	31.60
46	7.70	0.50	5.78	31.22
48	8.25	0.55	6.19	30.84
50	8.65	0.40	6.49	30.54
52	9.10	0.45	6.83	30.17
54	9.55	0.45	7.16	29.84
56	9.95	0.40	7.46	29.54
58	10.45	0.50	7.84	29.16
60	10.95	0.50	8.21	28.79
62	11.40	0.45	8.55	28.45
64	11.90	0.50	8.93	28.07
66	12.40	0.50	9.30	27.70
68	12.85	0.45	9.64	27.36
70	13.35	0.50	10.01	26.99
72	13.80	0.45	10.35	26.65

Stab (36).

Ndl. 12.0.
Max. 144.0; 28.70; red. 21.53.
Wdp. 35.0; 7.70; red. 5.78.

20	2.15		1.61	35.39
22	2.75	0.60	2.06	34.94
24	3.45	0.70	2.59	34.41
26	4.20	0.75	3.15	33.85
28	4.95	0.75	3.71	33.29
30	5.70	0.75	4.28	32.72
32	6.45	0.75	4.84	32.16
		0.80		

34	7.25	0.80	5.44	31.56
36	8.10	0.85	6.08	30.92
38	8.85	0.75	6.64	30.36
40	9.60	0.75	7.20	29.80
42	10.35	0.75	7.76	29.24
44	11.10	0.75	8.33	28.67
46	11.80	0.70	8.85	28.15
48	12.50	0.70	9.38	27.62
50	13.20	0.70	9.90	27.10
52	13.85	0.65	10.39	26.61
54	14.50	0.65	10.88	26.12
56	15.15	0.65	11.36	25.64
58	15.80	0.65	11.85	25.15
60	16.40	0.60	12.30	24.70

Stab (28).

Ndl. 10.0.
Max. 96.0; 23.95; red. 17.96.
Wdp. 24.0; 6.20; red. 4.65.

10	0.45		0.34	36.66
12	0.75	0.30	0.56	36.44
14	1.30	0.55	0.98	36.02
16	1.85	0.55	1.39	35.61
18	2.50	0.65	1.88	35.12
20	3.35	0.85	2.51	34.49
22	4.25	0.90	3.19	33.81
24	5.20	0.95	3.90	33.10
26	6.20	1.00	4.65	32.35
28	7.20	1.00	5.40	31.60
30	8.15	0.95	6.11	30.89
32	9.10	0.95	6.83	30.17
34	10.00	0.90	7.50	29.50
36	10.90	0.90	8.18	28.82
38	11.80	0.90	8.85	28.15
40	12.60	0.80	9.45	27.55

Stab (24).

Ndl. 9.0.
Max. 69.0; 19.00; red. 14.25.
Wdp. 22.0; 5.65; red. 4.24.

10	0.60		0.45	36.55
12	1.20	0.60	0.90	36.10
14	1.85	0.65	1.39	35.61
16	2.70	0.85	2.03	34.97
18	3.60	0.90	2.70	34.30
20	4.60	1.00	3.45	33.55
22	5.65	1.05	4.24	32.76
24	6.70	1.05	5.03	31.97
26	7.70	1.00	5.78	31.22
28	8.70	1.00	6.53	30.47
30	9.60	0.90	7.20	29.80

Stab (18).

Ndl. 8.0.
Max. 45.0; 14.65; red. 10.99.
Wdp. 19.5; 6.10; red. 4.58.

8	0.35	0.25	0.26	36.74
9	0.60	0.40	0.45	36.55
10	1.00	0.40	0.75	36.25
11	1.40	0.40	1.05	35.95
12	1.80	0.50	1.35	35.65
13	2.30	0.55	1.73	35.27
14	2.85	0.55	2.14	34.86
15	3.40	0.60	2.55	34.45
16	4.00	0.60	3.00	34.00
17	4.60	0.60	3.45	33.55
18	5.20	0.60	3.90	33.10
19	5.80	0.60	4.35	32.65
20	6.40	0.60	4.80	32.20
21	7.00	0.60	5.25	31.75
22	7.60	0.60	5.70	31.30
23	8.20	0.60	6.15	30.85
24	8.80	0.50	6.60	30.40
25	9.30	0.50	6.98	30.02
26	9.80		7.35	29.65

Minimalmoment.
Ndl. 7.0.
Max. 24.0; 8.35; red. 6.26.

Reihe der aufsteigenden Trägheitsmomente.
Beginn 12 h 15 m.
Schluss 12 h 42 m.

Minimalmoment.
Ndl. 7.5.
Max. 22.5; 7.85; red. 5.89.

Stab (18).
Ndl. 8.0.
Max. 42.0; 12.50; red. 9.38.
Wdp. 18.0; 5.20; red. 3.90.

6	0.25	0.15	0.19	36.81
7	0.40	0.30	0.30	36.70
8	0.70	0.30	0.53	36.47
9	1.00	0.35	0.75	36.25
10	1.35	0.35	1.01	35.99
11	1.70	0.45	1.28	35.72
12	2.15	0.45	1.61	35.39
13	2.60	0.45	1.95	35.05
14	3.05	0.55	2.29	34.71
15	3.60	0.50	2.70	34.30
16	4.10	0.50	3.08	33.92
17	4.60	0.60	3.45	33.55
18	5.20	0.50	3.90	33.10
19	5.70	0.60	4.28	32.72
20	6.30	0.50	4.73	32.27
21	6.80	0.50	5.10	31.90
22	7.30	0.50	5.48	31.52
23	7.80	0.50	5.85	31.15
24	8.30	0.40	6.23	30.77
25	8.70		6.53	30.47

Stab (24).
Ndl. 7.5.
Max. 64.5; 15.10; red. 11.33.
Wdp. 23.0; 5.25; red. 3.94.

10	0.50	0.50	0.38	36.62
12	1.00	0.60	0.75	36.25
14	1.60	0.65	1.20	35.80
16	2.25	0.80	1.69	35.31
18	3.05	0.90	2.29	34.71
20	3.95	0.85	2.96	34.04
22	4.80	0.90	3.60	33.40
24	5.70	0.85	4.28	32.72
26	6.55	0.90	4.91	32.09
28	7.45	0.75	5.59	31.41
30	8.20		6.15	30.85

Stab (28).
Ndl. 7.5.
Max. 77.5; 15.60; red. 11.70.
Wdp. 29.0; 6.15; red. 4.61.

10	0.30	0.30	0.23	36.87
12	0.60	0.40	0.45	36.55
14	1.00	0.45	0.75	36.25
16	1.45	0.65	1.09	35.91
18	2.10	0.65	1.58	35.42
20	2.75	0.75	2.06	34.94
22	3.50	0.75	2.63	34.37
24	4.25	0.75	3.19	33.81
26	5.00	0.75	3.75	33.25
28	5.75	0.80	4.31	32.69
30	6.55	0.75	4.91	32.09
32	7.30	0.70	5.48	31.52
34	8.00		6.00	31.00

Stab (36).
Ndl. 7.5.
Max. 109.0; 14.25; red. 10.69.
Wdp. ?.

16	0.60	0.30	0.45	36.55
18	0.90	0.40	0.68	36.32
20	1.30	0.40	0.98	36.02
22	1.70	0.40	1.28	35.72
24	2.10	0.55	1.58	35.42
26	2.65	0.55	1.99	35.01
28	3.20	0.45	2.40	34.60
30	3.65	0.50	2.74	34.26
32	4.15	0.45	3.11	33.89
34	4.60	0.40	3.45	33.55
36	5.20	0.50	3.90	33.10
38	5.70	0.50	4.28	32.72
40	6.20		4.65	32.35

Stab (48).
Ndl. 7.0.
Max. 124.0; 8.55; red. 6.41.
Wdp. 37.0; 2.60; red. 1.95.

20	0.60	0.20	0.45	36.55
22	0.80	0.20	0.60	36.40
24	1.00	0.20	0.75	36.25
26	1.20	0.20	0.90	36.10
28	1.40	0.25	1.05	35.95
		0.25		
30	1.65	0.25	1.24	35.76
32	1.90	0.25	1.43	35.57
34	2.15	0.30	1.61	35.39
36	2.45	0.30	1.84	35.16
38	2.75	0.30	2.06	34.94
40	3.05	0.25	2.29	34.71
42	3.30	0.25	2.48	34.52
44	3.55	0.25	2.66	34.34
46	3.80	0.25	2.85	34.15
48	4.05	0.25	3.04	33.96
50	4.30	0.20	3.23	33.77
52	4.50	0.20	3.38	33.62
54	4.70	0.20	3.53	33.47
56	4.90	0.20	3.68	33.32
58	5.10	0.20	3.83	33.17
60	5.30		3.98	33.02

Stab (60).
Ndl. 7.0.
Max. 148.0; 5.55; red. 4.16.
Wdp. 36.0; 1.30; red. 0.98.

20	0.20	0.10	0.15	36.85
22	0.30	0.10	0.23	36.77
24	0.40	0.15	0.30	36.70
26	0.55	0.15	0.41	36.59
28	0.70	0.15	0.53	36.47
30	0.85	0.15	0.64	36.36
32	1.00	0.15	0.75	36.25
34	1.15	0.15	0.86	36.14
36	1.30	0.15	0.98	36.02
38	1.45	0.15	1.09	35.93
40	1.60	0.15	1.20	35.80
42	1.75	0.15	1.31	35.69
44	1.90	0.15	1.43	35.47
46	2.05	0.15	1.54	35.46
48	2.20	0.10	1.65	35.35
50	2.30		1.73	35.27

Versuch XLIII. 26. X. 88.

Anf.-Sp. 66.42 g.
Muskellänge 36 mm.
Muskelmasse 3.071 g.

Reihe der absteigenden Trägheitsmomente.

Beginn 3 h 32 m.
Schluss 4 h 7 m.

Stab (60).
Ndl. 16.0.
Max. 243.0; 18.00; red. 13.50.
Wdp. 47.0; 3.85; red. 2.89.

20	0.45	0.15	0.34	35.66
22	0.60	0.20	0.45	35.55

24	0.80	0.20	0.60	35.40
26	1.05	0.25	0.79	35.21
28	1.30	0.25	0.98	35.02
30	1.50	0.20	1.13	34.87
32	1.75	0.25	1.31	34.69
34	2.00	0.25	1.50	34.50
36	2.30	0.30	1.73	34.27
38	2.60	0.30	1.95	34.05
40	2.90	0.30	2.18	33.82
42	3.20	0.30	2.40	33.60
44	3.45	0.25	2.59	33.41
46	3.70	0.25	2.78	33.22
48	4.00	0.30	3.00	33.00
50	4.30	0.30	3.23	32.77
52	4.60	0.30	3.45	32.55
54	4.85	0.25	3.64	32.36
56	5.15	0.30	3.86	32.14
58	5.45	0.30	4.09	31.91
60	5.70	0.25	4.28	31.72
62	6.00	0.30	4.50	31.50
64	6.25	0.25	4.69	31.31
66	6.50	0.25	4.88	31.12
68	6.75	0.25	5.06	30.94
70	7.00	0.25	5.25	30.75
72	7.20	0.20	5.40	30.60

Stab (48).

Ndl. 11.0.
Max. 183.0; 21.10; red. 15.83.
Wdp. 13.0; 5.30; red. 3.98.

20	0.60	0.25	0.45	35.55
22	0.85	0.35	0.64	35.36
24	1.20	0.35	0.90	35.10
26	1.55	0.30	1.16	34.84
28	1.85	0.40	1.39	34.61
30	2.25	0.40	1.69	34.31
32	2.65	0.40	1.99	34.01
34	3.05	0.45	2.29	33.71
36	3.50	0.50	2.63	33.37
38	4.00	0.50	3.00	33.00
40	4.50	0.50	3.38	32.62
42	5.00	0.45	3.75	32.25
44	5.45	0.40	4.09	31.91
46	5.85	0.40	4.39	31.61
48	6.25	0.45	4.69	31.31
50	6.70	0.45	5.03	30.97
52	7.15	0.40	5.36	30.64
54	7.55	0.35	5.66	30.34
56	7.90	0.45	5.93	30.07
58	8.35	0.35	6.26	29.74
60	8.70	0.45	6.53	29.47
62	9.15	0.45	6.86	29.14
64	9.60	0.35	7.20	28.80
66	9.95	0.35	7.46	28.54
68	10.30	0.35	7.73	28.27
70	10.65	0.35	7.99	28.01
72	11.00	0.35	8.25	27.75
		0.35		

74	11.35	0.35	8.51	27.49
76	11.65	0.30	8.74	27.26
78	12.00	0.35	9.00	27.00
80	12.30	0.30	9.23	26.77

Stab (36).

Ndl. 12.0.
Max. 130.0; 24.85; red. 18.64.
Wdp. 37.5; 8.45; red. 6.34.

20	1.90	0.50	1.43	34.57
22	2.40	0.55	1.80	34.20
24	3.05	0.70	2.29	33.71
26	3.75	0.75	2.81	33.19
28	4.50	0.70	3.38	32.62
30	5.20	0.70	3.90	32.10
32	5.90	0.80	4.43	31.57
34	6.70	0.70	5.03	30.97
36	7.40	0.70	5.55	30.45
38	8.10	0.70	6.08	29.92
40	8.80	0.65	6.60	29.40
42	9.45	0.65	7.09	28.91
44	10.10	0.70	7.58	28.42
46	10.80	0.70	8.10	27.90
48	11.50	0.70	8.63	27.37
50	12.20	0.55	9.15	26.85
52	12.75	0.60	9.56	26.44
54	13.35	0.50	10.01	25.99
56	13.85	0.55	10.39	25.61
58	14.40	0.60	10.80	25.20
60	15.00		11.25	24.75

Stab (28).

Ndl. 12.0.
Max. 87.0; 20.40; red. 15.30.
Wdp. 27.0; 6.50; red. 4.88.

10	0.35	0.45	0.26	35.74
12	0.80	0.50	0.60	35.40
14	1.30	0.60	0.98	35.02
16	1.90	0.70	1.43	34.57
18	2.60	0.80	1.95	34.05
20	3.40	0.80	2.55	33.45
22	4.20	0.90	3.15	32.85
24	5.10	0.90	3.83	32.17
26	6.00	1.00	4.50	31.50
28	7.00	0.85	5.25	30.75
30	7.85	0.85	5.89	30.11
32	8.70	0.80	6.53	29.47
34	9.50	0.80	7.13	28.87
36	10.30	0.80	7.73	28.27
38	11.10	0.75	8.33	27.67
40	11.85		8.89	27.11

Stab (24).

Ndl. 12.0.
Max. 68.5; 17.30; red. 12.98.
Wdp. 23.0; 5.30; red. 3.98.

10	0.45	0.40	0.34	35.66
12	0.85	0.50	0.64	35.36
14	1.35	0.75	1.01	34.99
16	2.10	0.85	1.58	34.42
18	2.95	0.90	2.21	33.79
20	3.85	0.95	2.89	33.11
22	4.80	1.00	3.60	32.40
24	5.80	0.95	4.35	31.65
26	6.75	0.95	5.06	30.94
28	7.70	0.95	5.78	30.22
30	8.65	0.90	6.49	29.51
32	9.55	0.90	7.16	28.84
34	10.45	0.75	7.84	28.16
36	11.20	0.70	8.40	27 60
38	11.90	0.70	8.93	27.07
40	12.60		9.45	26.55

Stab (18).

Ndl. 11.0
Max. 42.0; 12.65; red. 9.49.
Wdp. 18.0; 5.10; red. 3.83.

8	0.30	0.30	0.23	35.77
9	0.60	0.40	0.45	35.55
10	1.00	0.40	0.75	35.25
11	1.40	0.40	1.05	34.95
12	1.80	0.50	1.35	34.65
13	2.30	0.50	1.73	34.27
14	2.80	0.55	2.10	33.90
15	3.35	0.55	2.51	33.49
16	3.90	0.60	2.93	33.07
17	4.50	0.60	3.38	32.62
18	5.10	0.60	3.83	32.17
19	5.70	0.55	4.28	31.72
20	6.25	0.60	4.69	31.31
21	6.85	0.55	5.14	30.86
22	7.40	0.45	5.55	30.45
23	7.85	0.40	5.89	30.11
24	8.25	0.45	6.19	29.81
25	8.70		6.53	29.47

Minimalmoment.

Ndl. 10.5.
Max. 25.5; 8.50; red. 6.38.

Reihe der aufsteigenden Trägheitsmomente.

Beginn 4 h 9 m.
Schluss 4 h 36 m.

Minimalmoment.

Ndl. 9.0.
Max. 26.0; 7.15; red. 5.36.

Stab (18).

Ndl. 9.0.
Max. 42.0; 12.35; red. 9.26.
Wdp. 18.0; 5.00; red. 3.75.

8	0.50	0.30	0.38	35.62
9	0.80	0.35	0.60	35.40

Digitized by Google

10	1.15	0.35	0.86	35.14
11	1.50	0.35	1.13	34.87
12	1.90	0.40	1.43	34.57
13	2.30	0.40	1.73	34.27
14	2.80	0.50	2.10	33.90
15	3.40	0.60	2.55	33.45
16	3.90	0.50	2.93	33.07
17	4.45	0.55	3.34	32.66
18	5.00	0.55	3.75	32.25
19	5.55	0.55	4.16	31.84
20	6.05	0.50	4.54	31.46
21	6.55	0.50	4.91	31.09
22	7.10	0.55	5.33	30.67
23	7.60	0.50	5.70	30.30
24	8.05	0.45	6.04	29.96
25	8.50	0.45	6.38	29.62

Stab (24).

Ndl. 9.5.
Max. 66.5; 16.65; red. 12.49.
Wdp. 24.0; 6.10; red. 4.58.

10	0.55		0.41	35.59
12	1.15	0.60	0.86	35.14
14	1.80	0.65	1.35	34.65
16	2.50	0.70	1.88	34.12
18	3.30	0.80	2.48	33.52
20	4.20	0.90	3.15	32.85
22	5.10	0.90	3.83	32.17
24	6.10	1.00	4.58	31.42
26	7.10	1.00	5.33	30.67
28	7.90	0.80	5.93	30.07
30	8.80	0.90	6.60	29.40
32	9.60	0.80	7.20	28.80
34	10.40	0.80	7.80	28.20
36	11.20	0.80	8.40	27.60
38	11.85	0.65	8.89	27.11
40	12.45	0.60	9.34	26.66

Stab (28).

Ndl. 10.0.
Max. 83.5; 17.45; red. 13.09.
Wdp. 27.0; 5.70; red. 4.28.

10	0.40		0.30	35.70
12	0.70	0.30	0.53	35.47
14	1.10	0.40	0.83	35.17
16	1.70	0.60	1.28	34.72
18	2.30	0.60	1.73	34.27
20	3.00	0.70	2.25	33.75
22	3.70	0.70	2.78	33.22
24	4.50	0.80	3.38	32.62
26	5.30	0.80	3.98	32.02
28	6.10	0.80	4.58	31.42
30	6.90	0.80	5.18	30.82
32	7.70	0.80	5.78	30.22
34	8.40	0.70	6.30	29.70
36	9.10	0.70	6.83	29.17
38	9.80	0.70	7.35	28.65
40	10.50	0.70	7.88	28.12

Stab (36).

Ndl. 9.5
Max. 116.5; 18.30; red. 13.73.
Wdp. 34.0; 5.35; red. 4.01.

20	1.30		0.98	35.02
22	1.80	0.50	1.35	34.65
24	2.40	0.60	1.80	34.20
26	3.00	0.60	2.25	33.75
28	3.50	0.50	2.63	33.37
30	4.10	0.60	3.08	32.92
32	4.70	0.60	3.53	32.47
34	5.35	0.65	4.01	31.99
36	6.00	0.65	4.50	31.50
38	6.60	0.60	4.95	31.05
40	7.20	0.60	5.40	30.60
42	7.70	0.50	5.78	30.22
44	8.30	0.60	6.23	29.77
46	8.80	0.50	6.60	29.40
48	9.30	0.50	6.98	29.02
50	9.80	0.50	7.35	28.65

Stab (48).

Ndl. 9.5.
Max. 153.0; 13.10; red. 9.83.
Wdp. 42.0; 4.10; red. 3.08.

20	0.75		0.56	35.44
22	1.00	0.25	0.75	35.25
24	1.25	0.25	0.94	35.06
26	1.50	0.25	1.13	34.87
28	1.80	0.30	1.35	34.65
30	2.10	0.30	1.58	34.42
32	2.45	0.35	1.84	34.16
34	2.80	0.35	2.10	33.90
36	3.15	0.35	2.36	33.64
38	3.50	0.35	2.63	33.37
40	3.80	0.30	2.85	33.15
42	4.10	0.30	3.08	32.92
44	4.45	0.35	3.34	32.66
46	4.80	0.35	3.60	32.40
48	5.10	0.30	3.83	32.17
50	5.40	0.30	4.05	31.95
52	5.70	0.30	4.28	31.72
54	6.00	0.30	4.50	31.50
56	6.25	0.25	4.69	31.31
58	6.55	0.30	4.91	31.09
60	6.80	0.25	5.10	30.90
62	7.05	0.25	5.29	30.71
64	7.30	0.25	5.48	30.52
66	7.60	0.30	5.70	30.30
68	7.90	0.30	5.93	30.07
70	8.15	0.25	6.11	29.89
72	8.45	0.30	6.34	29.66
74	8.70	0.25	6.53	29.47
76	8.90	0.20	6.68	29.32
78	9.10	0.20	6.83	29.17
80	9.30	0.20	6.98	29.02

Stab (60).

Ndl. 9.0
Max. 172.0; 8.05; red. 6.04.
Wdp. 44.0; 2.25; red. 1.69.

20	0.35		0.26	35.74
22	0.45	0.10	0.34	35.66
24	0.55	0.10	0.41	35.59
26	0.70	0.15	0.53	35.37
28	0.85	0.15	0.64	35.36
30	1.00	0.15	0.75	35.25
32	1.15	0.15	0.86	35.14
34	1.30	0.15	0.98	35.02
36	1.50	0.20	1.13	34.87
38	1.65	0.15	1.24	34.76
40	1.85	0.20	1.39	34.61
42	2.05	0.20	1.54	34.46
44	2.25	0.20	1.69	34.31
46	2.45	0.20	1.84	34.16
48	2.65	0.20	1.99	34.01
50	2.85	0.20	2.14	33.86
52	3.00	0.15	2.25	33.75
54	3.20	0.20	2.40	33.60
56	3.35	0.15	2.51	33.49
58	3.50	0.15	2.63	33.37
60	3.65	0.15	2.74	33.26
62	3.80	0.15	2.85	33.15
64	3.95	0.15	2.96	33.04
66	4.10	0.15	3.08	32.92
68	4.25	0.15	3.19	32.81
70	4.40	0.15	3.30	32.70

Versuch XLIV. 27/X. 88.

Anf.-Sp. 66.12 g.
Muskellänge 39 mm.
Muskelmasse 4.562 g.

Reihe der absteigenden Trägheitsmomente.

Beginn 11 h 32 m.
Schluss 12 h 10 m.

Stab (60).

Ndl. 10.5.
Max. 240.0; 18.50; red. 13.88.
Wdp. 47.0; 4.15; red. 3.11.

20	0.50		0.38	38.62
22	0.70	0.20	0.53	38.47
24	0.90	0.20	0.68	38.32
26	1.15	0.25	0.86	38.14
28	1.40	0.25	1.05	37.95
30	1.60	0.20	1.20	37.80
32	1.85	0.25	1.39	37.61
34	2.15	0.30	1.61	37.39
36	2.50	0.35	1.88	37.12
38	2.80	0.30	2.10	36.90
		0.30		

Digitized by Google

40	3.10	0.30	2.33	36.67
42	3.40	0.30	2.55	36.45
44	3.70	0.30	2.78	36.22
46	4.00	0.30	3.00	36.00
48	4.30	0.30	3.23	35.77
50	4.60	0.30	3.45	35.55
52	4.90	0.30	3.68	35.32
54	5.20	0.30	3.90	35.10
56	5.50	0.30	4.13	34.87
58	5.80	0.30	4.35	34.65
60	6.10	0.30	4.58	34.42
62	6.40	0.30	4.80	34.20
64	6.65	0.25	4.99	34.01
66	6.85	0.20	5.14	33.86
68	7.10	0.25	5.33	33.67
70	7.40	0.30	5.55	33.45
72	7.60	0.20	5.70	33.30
74	7.90	0.30	5.93	33.07
76	8.20	0.30	6.15	32.85
78	8.40	0.20	6.30	32.70
80	8.60	0.20	6.45	32.55

Stab (48).

Ndl. 10.0.
Max. 179.0; 19.45; red. 14.59.
Wdp. 40.0; 4.40; red. 3.30.

20	0.60		0.45	38.55
22	0.90	0.30	0.68	38.32
24	1.20	0.30	0.90	38.10
26	1.50	0.30	1.13	37.87
28	1.85	0.35	1.39	37.61
30	2.20	0.35	1.65	37.35
32	2.60	0.40	1.95	37.05
34	3.05	0.45	2.29	36.71
36	3.50	0.45	2.63	36.37
38	3.90	0.40	2.93	36.07
40	4.40	0.50	3.30	35.70
42	4.85	0.45	3.64	35.36
44	5.20	0.35	3.90	35.10
46	5.65	0.45	4.24	34.76
48	6.10	0.45	4.58	34.42
50	6.50	0.40	4.88	34.12
52	6.90	0.40	5.18	33.82
54	7.30	0.40	5.48	33.52
56	7.65	0.35	5.74	33.26
58	8.00	0.35	6.00	33.00
60	8.35	0.35	6.26	32.74

Stab (36).

Ndl. 9.0.
Max. 121.0; 21.00; red. 15.75.
Wdp. 33.0; 5.70; red. 4.28.

20	1.70		1.28	37.72
22	2.20	0.50	1.65	37.35
24	2.75	0.55	2.06	36.94
26	3.30	0.55	2.48	36.52
28	4.00	0.70	3.00	36.00
		0.60		

30	4.60	0.60	3.45	35.55
32	5.30	0.70	3.98	35.02
34	6.00	0.70	4.50	34.50
36	6.65	0.65	4.99	34.01
38	7.30	0.65	5.48	33.52
40	8.00	0.65	6.00	33.00
42	8.60	0.60	6.45	32.55
44	9.15	0.55	6.86	32.14
46	9.70	0.55	7.28	31.72
48	10.30	0.60	7.73	31.27
50	10.85	0.55	8.14	30.86
52	11.40	0.55	8.55	30.45
54	11.95	0.55	8.96	30.04
56	12.50	0.55	9.38	29.62
58	13.00	0.50	9.75	29.25
60	13.45	0.45	10.09	28.91

Stab (28).

Ndl. 8.5.
Max. 88.5; 20.20; red. 15.15.
Wdp. 25.0; 5.15; red. 3.86.

10	0.25		0.19	38.81
12	0.60	0.35	0.45	38.55
14	1.05	0.45	0.79	38.21
16	1.50	0.45	1.13	37.87
18	2.25	0.75	1.69	37.31
20	3.00	0.75	2.25	36.75
22	3.80	0.80	2.85	36.15
24	4.70	0.90	3.53	35.47
26	5.60	0.90	4.20	34.80
28	6.50	0.90	4.88	34.12
30	7.35	0.85	5.51	33.49
32	8.20	0.85	6.15	32.85
34	9.00	0.80	6.75	32.25
36	9.80	0.80	7.35	31.65
38	10.60	0.80	7.95	31.05
40	11.40	0.80	8.55	30.45

Stab (24).

Ndl. 8.0.
Max. 64.5; 17.35; red. 13.01.
Wdp. 23.0; 6.10; red. 4.58.

10	0.60		0.45	38.55
12	1.20	0.60	0.90	38.10
14	1.90	0.70	1.43	37.57
16	2.70	0.80	2.03	36.97
18	3.60	0.90	2.70	36.30
20	4.50	0.90	3.38	35.62
22	5.55	1.05	4.16	34.84
24	6.60	1.05	4.95	34.05
26	7.65	1.05	5.74	33.26
28	8.60	0.95	6.45	32.55
30	9.50	0.90	7.13	31.87
32	10.35	0.85	7.76	31.24

Stab (18).

Ndl. 7.5.
Max. 52.5; 12.35; red. 9.26.
Wdp. 17.5; 4.25; red. 3.19.

8	0.20		0.15	38.85
9	0.50	0.30	0.38	38.62
10	0.80	0.30	0.60	38.40
11	1.15	0.35	0.86	38.14
12	1.50	0.35	1.13	37.87
13	1.90	0.40	1.43	37.57
14	2.45	0.55	1.84	37.16
15	2.95	0.50	2.21	36.79
16	3.45	0.50	2.59	36.41
17	4.00	0.55	3.00	36.00
18	4.50	0.50	3.38	35.62
19	5.05	0.55	3.79	35.21
20	5.60	0.55	4.20	34.80
21	6.10	0.50	4.58	34.42
22	6.65	0.55	4.99	34.01
23	7.20	0.55	5.40	33.60
24	7.70	0.50	5.78	33.22
25	8.20	0.50	6.15	32.85

Minimalmoment.

Ndl. 7.0.
Max. 23.5; 7.45; red. 5.59.

Reihe der aufsteigenden Trägheitsmomente.

Beginn 12 h 15 m.
Schluss 12 h 31 m.

Minimalmoment.

Ndl. 6.0.
Max. 24.0; 7.35; red. 5.51.

Stab (18).

Ndl. 6.0.
Max. 42.0; 11.80; red. 8.85.
Wdp. 16.5; 3.80; red. 2.85.

8	0.30		0.23	38.77
9	0.55	0.25	0.41	38.59
10	0.90	0.35	0.68	38.32
11	1.25	0.35	0.94	38.06
12	1.65	0.40	1.24	37.76
13	2.10	0.45	1.58	37.42
14	2.55	0.45	1.91	37.09
15	3.00	0.45	2.25	36.75
16	3.50	0.50	2.63	36.37
17	4.10	0.60	3.08	35.92
18	4.60	0.50	3.45	35.55
19	5.10	0.50	3.83	35.17
20	5.60	0.50	4.20	34.80
21	6.10	0.50	4.58	34.42
22	6.60	0.50	4.95	34.05
23	7.10	0.50	5.33	33.67
24	7.60	0.50	5.70	33.30
25	8.10	0.50	6.08	32.92
26	8.50	0.40	6.38	32.62

Digitized by Google

Stab (24).

Ndl. 6.0.
Max. 64.0; 14.65; red. 10.99.
Wdp. 23.0; 5.35; red. 4.01.

10	0.75	0.35	0.56	38.44
12	1.40	0.55	0.83	38.17
14	1.65	0.65	1.24	37.76
16	2.30	0.80	1.73	37.27
18	3.10	0.90	2.33	36.67
20	4.00	0.90	3.00	36.00
22	4.90	0.90	3.68	35.32
24	5.80	0.90	4.35	34.65
26	6.70	0.90	5.03	33.97
28	7.60	0.90	5.70	33.30
30	8.50	0.70	6.38	32.62
32	9.20	0.70	6.90	32.10
34	9.90	0.70	7.43	31.57
36	10.60	0.60	7.95	31.05
38	11.20	0.60	8.40	30.60
40	11.80		8.85	30.15

Stab (28).

Ndl. 6.0.
Max. 77.0; 15.75; red. 11.81.
Wdp. 26.0; 5.00; red. 3.75.

10	0.25	0.30	0.19	38.81
12	0.55	0.45	0.41	38.59
14	1.00	0.40	0.75	38.25
16	1.40	0.60	1.05	37.95
18	2.00	0.70	1.50	37.50
20	2.70	0.75	2.03	36.97
22	3.45	0.75	2.59	36.41
24	4.20	0.80	3.15	35.85
26	5.00	0.80	3.75	35.25
28	5.80	0.75	4.35	34.65
30	6.55	0.75	4.91	34.09
32	7.30		5.48	33.52

Stab (36).

Ndl. 5.5.
Max. 106.0; 14.45; red. 10.84.
Wdp. 32.0; 4.30; red. 3.23.

20	1.45	0.30	1.09	37.91
22	1.75	0.45	1.31	37.69
24	2.20	0.50	1.65	37.35
26	2.70	0.50	2.03	36.97
28	3.20	0.55	2.40	36.60
30	3.75	0.55	2.81	36.19
32	4.30	0.55	3.23	35.77
34	4.85	0.55	3.64	35.36
36	5.40	0.50	4.05	34.95
38	5.90	0.50	4.43	34.57
40	6.40	0.50	4.80	34.20
42	6.90	0.50	5.18	33.82
44	7.40	0.45	5.55	33.45
46	7.85	0.45	5.89	33.11
48	8.30	0.45	6.23	32.77
50	8.75		6.56	32.44

Stab (48).

Ndl. 5.5.
Max. 129.0; 9.75; red. 7.31.
Wdp. ?.

20	0.60	0.20	0.45	38.55
22	0.80	0.20	0.60	38.40
24	1.00	0.25	0.75	38.25
26	1.25	0.25	0.94	38.06
28	1.50	0.25	1.13	37.87
30	1.75	0.35	1.31	37.69
32	2.10	0.30	1.58	37.42
34	2.40	0.30	1.80	37.20
36	2.70	0.30	2.03	36.97
38	3.00	0.30	2.25	36.75
40	3.30	0.30	2.48	36.52
42	3.60	0.25	2.70	36.30
44	3.85	0.25	2.89	36.11
46	4.10	0.25	3.08	35.92
48	4.35	0.30	3.26	35.74
50	4.65	0.25	3.49	35.51
52	4.90	0.30	3.68	35.32
54	5.20	0.20	3.90	35.10
56	5.40	0.20	4.05	34.95
58	5.60	0.20	4.20	34.80
60	5.80	0.25	4.35	34.65
62	6.05	0.25	4.54	34.46
64	6.30	0.20	4.73	34.27
66	6.50	0.15	4.88	34.12
68	6.65	0.15	4.99	34.01
70	6.80		5.10	33.90

Stab (60).

Ndl. 5.0.
Max. 132.0; 5.55; red. 4.16.

Versuch LVII. 13/XI. 88.

Anf.-Sp. 66.42 g.
Muskellänge 43 mm.
Muskelmasse 5.135 g.

Der Muskel hatte eine eigenthümliche hochrothe Farbe.

Beginn 3 h 37 m.
Schluss 4 h 48 m.

Minimalmoment.

Ndl. 7.0.
Max. 40.5; 13.55; red. 10.16.

Minimalmoment wdh.

Ndl. 7.5.
Max. 44.5; 14.60; red. 10.95.

Maximalmoment.

Ndl. 11.0.
Hub 3.35; red. 2.51.

Maximalmoment wdh.

Ndl. 11.0.
Hub 3.50; red. 2.63.

Maximalmoment wdh.

Ndl. 10.5.
Hub 3.25; red. 2.44.

Stab (122).

Ndl. 11.0.
Hub 7.00; red. 5.25.

Stab (100).

Ndl. 12.0.
Hub 24.40; red. 18.30.

Stab (80).

Ndl. 10.5.
Hub 32.00; red. 24.00.
Wdp. 68.0; 5.55; red. 4.16.

30	0.75	0.10	0.56	42.44
32	0.85	0.15	0.64	42.36
34	1.00	0.20	0.75	42.25
36	1.20	0.25	0.90	42.10
38	1.45	0.25	1.09	41.91
40	1.70	0.25	1.28	41.72
42	1.95	0.25	1.46	41.54
44	2.20	0.25	1.65	41.35
46	2.45	0.25	1.84	41.16
48	2.70	0.25	2.03	40.97
50	2.95	0.30	2.21	40.79
52	3.25	0.25	2.44	40.56
54	3.50	0.30	2.63	40.37
56	3.80	0.25	2.85	40.15
58	4.05	0.25	3.04	39.96
60	4.30	0.30	3.23	39.77
62	4.60	0.30	3.45	39.55
64	4.90	0.30	3.68	39.32
66	5.20	0.35	3.90	39.10
68	5.55	0.30	4.16	38.84
70	5.85	0.30	4.39	38.61
72	6.15	0.25	4.61	38.39
74	6.40	0.25	4.80	38.20
76	6.65	0.25	4.99	38.01
78	6.90	0.30	5.18	37.82
80	7.20	0.25	5.40	37.60
82	7.45	0.30	5.59	37.41
84	7.75	0.30	5.81	37.19
86	8.05	0.25	6.04	36.96
88	8.30	0.30	6.23	36.77
90	8.60	0.25	6.45	36.55
92	8.85	0.25	6.64	36.36
94	9.10	0.25	6.83	36.17
96	9.35	0.25	7.01	35.99
98	9.60	0.25	7.20	35.80
100	9.85		7.39	35.61

Digitized by Google

Stab (60).

Ndl. 10.0.
Hub 49.00; red. 36.75.
Wdp. 58.0; 8.80; red. 6.60.

30	1.85		1.39	41.61
32	2.20	0.35	1.55	41.45
34	2.60	0.40	1.85	41.15
36	3.00	0.40	2.25	40.75
38	3.50	0.50	2.63	40.37
40	4.00	0.50	3.00	40.00
42	4.50	0.50	3.38	39.62
44	5.00	0.50	3.75	39.25
46	5.55	0.55	4.16	38.84
48	6.10	0.55	4.58	38.42
50	6.65	0.55	4.99	38.01
52	7.20	0.55	5.40	37.60
54	7.75	0.55	5.81	37.19
56	8.30	0.55	6.23	36.77
58	8.80	0.50	6.60	36.40
60	9.35	0.55	7.01	35.99
62	9.85	0.50	7.39	35.61
64	10.40	0.55	7.80	35.20
66	10.90	0.50	8.18	34.82
68	11.40	0.50	8.55	34.45
70	11.95	0.55	8.96	34.04
72	12.50	0.55	9.38	33.62
74	13.00	0.50	9.75	33.25
76	13.50	0.50	10.13	32.87
78	14.00	0.50	10.50	32.50
80	14.50	0.50	10.88	32.12
82	15.00	0.50	11.25	31.75
84	15.50	0.50	11.63	31.37
86	16.00	0.50	12.00	31.00
88	16.50	0.50	12.38	30.62
90	17.00	0.50	12.75	30.25
92	17.45	0.45	13.09	29.91
94	17.90	0.45	13.43	29.57
96	18.35	0.45	13.76	29.24
98	18.80	0.45	14.10	28.90
100	19.30	0.50	14.48	28.52

Stab (48).

Ndl. 9.5.
Max. 251.0; 45.60; red. 34.20.
Wdp. 49.0; 9.95; red. 7.46.

20	1.10		0.83	42.17
22	1.50	0.40	1.13	41.87
24	1.90	0.40	1.43	41.57
26	2.40	0.50	1.80	41.20
28	2.90	0.50	2.18	40.82
30	3.40	0.50	2.55	40.45
32	4.00	0.60	3.00	40.00
34	4.60	0.60	3.45	39.55
36	5.30	0.70	3.98	39.02
38	6.05	0.75	4.54	38.46
40	6.75	0.70	5.06	37.94
42	7.45	0.70	5.59	37.41
		0.75		
		0.75		
44	8.20		6.15	36.85
46	8.85	0.65	6.64	36.36
48	9.60	0.75	7.20	35.80
50	10.30	0.70	7.73	35.27
52	11.00	0.70	8.25	34.75
54	11.70	0.70	8.78	34.22
56	12.40	0.70	9.30	33.70
58	13.10	0.70	9.83	33.17
60	13.80	0.70	10.35	32.65
62	14.50	0.70	10.88	32.12
64	15.20	0.70	11.40	31.60

Stab (40).

Ndl. 9.0.
Max. 176.0; 37.10; red. 27.83.
Wdp. 37.0; 7.35; red. 5.51.

20	1.35		1.01	41.99
22	1.90	0.55	1.43	41.57
24	2.50	0.60	1.88	41.12
26	3.10	0.60	2.33	40.67
28	3.80	0.70	2.85	40.15
30	4.55	0.75	3.41	39.59
32	5.35	0.80	4.01	38.99
34	6.10	0.75	4.58	38.42
36	6.90	0.80	5.18	37.82
38	7.80	0.90	5.85	37.15
40	8.60	0.80	6.45	36.55
42	9.40	0.80	7.05	35.95
44	10.20	0.80	7.65	35.35
46	11.00	0.80	8.25	34.75
48	11.80	0.80	8.85	34.15
50	12.60	0.80	9.45	33.55
52	13.40	0.80	10.05	32.95
54	14.20	0.80	10.65	23.35
56	15.00	0.80	11.25	31.75

Stab (36).

Ndl. 8.5.
Max. 139.0; 28.65; red. 21.49.
Wdp. 35.0; 6.30; red. 4.73.

20	1.30		0.98	42.02
22	1.80	0.50	1.35	41.65
24	2.35	0.55	1.76	41.24
26	3.00	0.65	2.25	40.75
28	3.65	0.65	2.74	40.26
30	4.30	0.65	3.23	39.77
32	5.05	0.75	3.79	39.21
34	5.85	0.80	4.39	38.61
36	6.70	0.85	5.03	37.97
38	7.55	0.85	5.66	37.34
40	8.30	0.75	6.23	36.77
42	9.10	0.80	6.83	36.17
44	9.90	0.80	7.43	35.57
46	10.70	0.80	8.03	34.97
48	11.50	0.80	8.63	34.37
50	12.25	0.75	9.19	33.81
		0.75		
		0.75		
52	13.00		9.75	33.25
54	13.70	0.70	10.28	32.72
56	14.40	0.70	10.80	32.20
58	15.05	0.65	11.29	31.71
60	15.70	0.65	11.78	31.22

Stab (32).

Ndl. 7.5
Max. 103.5; 25.10; red. 18.83.
Wdp. 35.0; 7.50; red. 5.63.

16	0.80		0.60	42.40
18	1.25	0.45	0.94	42.06
20	1.75	0.50	1.31	41.69
22	2.30	0.55	1.73	41.27
24	3.00	0.70	2.25	40.75
26	3.75	0.75	2.81	40.19
28	4.55	0.80	3.41	39.59
30	5.35	0.80	4.01	38.99
32	6.20	0.85	4.65	38.35
34	7.05	0.85	5.29	37.71
36	7.95	0.90	5.96	37.04
38	8.80	0.85	6.60	36.40
40	9.65	0.85	7.24	35.76
42	10.50	0.85	7.88	35.12
44	11.35	0.85	8.51	34.49
46	12.10	0.85	9.08	33.92
48	12.90	0.80	9.68	33.32
50	13.60	0.70	10.20	32.80
52	14.30	0.70	10.73	32.27
54	15.00	0.70	11.25	31.75
56	15.70	0.70	11.78	31.22
58	16.35	0.65	12.26	30.74
60	17.00	0.65	12.75	30.25

Stab (28).

Ndl. 7.0;
Max. 88.5; 20.65; red. 15.49.
Wdp. 28.0; 5.35; red. 4.01.

16	0.80		0.60	42.40
18	1.30	0.50	0.98	42.02
20	1.90	0.60	1.43	41.57
22	2.60	0.70	1.95	41.05
24	3.50	0.90	2.63	40.37
26	4.40	0.90	3.30	39.70
28	5.35	0.95	4.01	38.99
30	6.30	0.95	4.72	38.28
32	7.20	0.90	5.40	37.60
34	8.10	0.90	6.08	36.92
36	9.00	0.90	6.75	36.25
38	9.90	0.90	7.43	35.57
40	10.70	0.80	8.03	34.93
42	11.50	0.80	8.63	34.37
44	12.30	0.80	9.23	33.77

Stab (24).

Ndl. 6.0.
Max. 68.0; 16.75; red. 12.56.
Wdp. 27.0; 5.65; red. 4.24.

Digitized by Google

14	0.40	0.60	0.30	42.70
16	1.00	0.70	0.75	42.25
18	1.70	0.80	1.28	41.72
20	2.50	0.80	1.88	41.12
22	3.30	0.90	2.48	40.52
24	4.20	1.00	3.15	39.85
26	5.20	0.90	3.90	39.10
28	6.10	1.00	4.58	38.42
30	7.10	0.90	5.33	37.67
32	8.00	0.85	6.00	37.00
34	8.85	0.85	6.64	36.36
36	9.70	0.90	7.28	35.72
38	10.60	0.80	7.95	35.05
40	11.40	0.80	8.55	34.45
42	12.20		9.15	33.85

Stab (18).

Ndl. 5.5.
Max. 49.5; 12.30; red. 9.23.
Wdp. 24.0; 5.30; red. 3.98.

12	0.45	0.55	0.34	42.66
14	1.00	0.65	0.75	42.25
16	1.65	0.90	1.24	41.76
18	2.55	0.90	1.91	41.09
20	3.45	0.90	2.59	40.41
22	4.35	0.95	3.26	39.74
24	5.30	0.95	3.98	39.02
26	6.25	0.85	4.69	38.31
28	7.10	0.80	5.33	37.67
30	7.90		5.93	37.07

Minimalmoment.

Ndl. 4.5.
Max. 41.5; 10.70; red. 8.03.

Maximalmoment.

Ndl. 6.5.
Hub 2.15; red. 1.61.

Maximalmoment wdh.

Ndl. 6.5.
Hub 2.45; red. 1.84.

Versuch LIX. 14/XI. 88.

Anf.-Sp. 66.42 g.
Muskellänge 35 mm.
Muskelmasse 3.493 g.

Muskel blass, blutleer.

Beginn 3 h 38 m.
Schluss 4 h 43 m.

Minimalmoment.

Ndl. 8.0.
Max. 36.5; 9.05; red. 6.79.

Minimalmoment wdh.

Ndl. 8.0.
Max. 37.0; 9.15; red. 6.86.

Maximalmoment.

Ndl. 11.0.
Hub 1.60; red. 1.20.

Maximalmoment wdh.

Ndl. 11.5.
Hub 2.25; red. 1.69.

Stab (122).

Ndl. 12.0.
Hub 6.70; red. 5.03.

Stab (100).

Ndl. 12.5.
Hub 9.40; red. 7.05.

Stab (80).

Ndl. 12.5.
Hub. 12.90; red. 9.68.

Stab (60).

Ndl. 11.5.
Max. 234.0; 19.45; red. 14.59.
Wdp. 56.0; 4.35; red. 3.26.

20	0.10	0.10	0.08	34.92
22	0.20	0.10	0.15	34.85
24	0.30	0.10	0.23	34.77
26	0.40	0.10	0.30	34.70
28	0.55	0.15	0.41	34.59
30	0.70	0.20	0.53	34.47
32	0.90	0.20	0.68	34.32
34	1.10	0.20	0.83	34.17
36	1.30	0.20	0.98	34.02
38	1.50	0.20	1.13	33.87
40	1.70	0.30	1.28	33.72
42	2.00	0.30	1.50	33.50
44	2.30	0.30	1.73	33.27
46	2.60	0.35	1.95	33.05
48	2.95	0.35	2.21	32.79
50	3.30	0.35	2.48	32.52
52	3.65	0.35	2.74	32.26
54	4.00	0.35	3.00	32.00
56	4.35	0.35	3.26	31.74
58	4.70	0.30	3.53	31.47
60	5.00	0.30	3.75	31.25
62	5.30	0.35	3.98	31.02
64	5.65	0.35	4.24	30.76
66	6.00	0.30	4.50	30.50
68	6.30	0.30	4.73	30.27
70	6.60	0.25	4.95	30.05
72	6.85	0.30	5.14	29.86
74	7.15	0.30	5.36	29.64
76	7.45	0.30	5.59	29.41
78	7.75	0.30	5.81	29.19
		0.30		
80	8.05	0.30	6.04	28.96
82	8.35	0.25	6.26	28.74
84	8.60	0.30	6.45	28.55
86	8.90	0.25	6.68	28.32
88	9.15	0.25	6.86	28.14
90	9.40		7.05	27.95

Stab (48).

Ndl. 10.5.
Max. 170.0; 19.45; red. 14.59.
Wdp. 46.0; 5.10; red. 3.83.

20	0.30	0.20	0.23	34.77
22	0.50	0.20	0.38	34.62
24	0.70	0.30	0.53	34.47
26	1.00	0.30	0.75	34.25
28	1.30	0.35	0.98	34.02
30	1.65	0.35	1.24	33.76
32	2.00	0.40	1.50	33.50
34	2.40	0.40	1.80	33.20
36	2.80	0.45	2.10	32.90
38	3.25	0.50	2.44	32.56
40	3.75	0.50	2.81	32.19
42	4.25	0.45	3.19	31.81
44	4.70	0.40	3.53	31.47
46	5.10	0.50	3.83	31.17
48	5.60	0.50	4.20	30.80
50	6.10	0.40	4.58	30.42
52	6.50	0.45	4.88	30.12
54	6.95	0.45	5.21	29.79
56	7.40	0.40	5.55	29.45
58	7.80	0.40	5.85	29.15
60	8.20	0.40	6.15	28.85
62	8.60	0.40	6.45	28.55
64	9.00		6.75	28.25

Stab (40).

Ndl. 9.0.
Max. 126.0; 17.40; red. 13.05.
Wdp. 40.0; 5.60; red. 4.20.

20	1.00	0.30	0.75	34.25
22	1.30	0.35	0.98	34.02
24	1.65	0.40	1.24	33.76
26	2.05	0.50	1.54	33.46
28	2.55	0.45	1.91	33.09
30	3.00	0.50	2.25	32.75
32	3.50	0.50	2.63	32.37
34	4.00	0.50	3.00	32.00
36	4.50	0.50	3.38	31.62
38	5.00	0.60	3.75	31.25
40	5.60	0.60	4.20	30.80
42	6.20	0.50	4.65	30.35
44	6.70	0.50	5.03	29.97
46	7.20	0.50	5.40	29.60
48	7.70	0.40	5.78	29.22
50	8.10	0.50	6.08	28.92
52	8.60	0.50	6.45	28.55
54	9.10	0.40	6.83	28.17

Digitized by Google

56	9.50	0.40	7.13	27.87
58	10.00	0.50	7.50	27.50
60	10.40	0.40	7.80	27.20
62	10.80	0.40	8.10	26.90
64	11.20	0.40	8.40	26.60
66	11.60	0.40	8.70	26.30
68	12.00	0.40	9.00	26.00

Stab (36).

Ndl. 8.0.
Max. 109.0; 15.25; red. 11.44.
Wdp. 37.0; 4.80; red. 3.60.

20	0.60	0.40	0.45	34.55
22	1.00	0.40	0.75	34.25
24	1.40	0.45	1.05	33.95
26	1.85	0.45	1.39	33.64
28	2.30	0.55	1.73	33.27
30	2.85	0.55	2.14	32.86
32	3.40	0.55	2.55	32.45
34	3.95	0.55	2.96	32.04
36	4.50	0.60	3.38	31.62
38	5.10	0.55	3.83	31.17
40	5.65	0.55	4.24	30.76
42	6.20	0.55	4.65	30.35
44	6.75	0.55	5.06	29.94
46	7.30	0.50	5.48	29.52
48	7.80	0.50	5.85	29.15
50	8.30	0.50	6.23	28.77
52	8.80		6.60	28.40

Stab (28).

Ndl. 7.0.
Max. 69.0; 11.90; red. 8.93.
Wdp. 30.0; 4.65; red. 3.49.

16	0.70	0.40	0.53	34.47
18	1.10	0.50	0.83	34.17
20	1.60	0.55	1.20	33.80
22	2.15	0.55	1.61	33.39
24	2.70	0.65	2.03	32.97
26	3.35	0.65	2.51	32.49
28	4.00	0.65	3.00	32.00
30	4.65	0.65	3.49	31.51
32	5.30	0.70	3.98	31.02
34	6.00	0.60	4.50	30.50
36	6.60	0.60	4.95	30.05
38	7.20	0.60	5.40	29.60
40	7.80	0.55	5.85	29.15
42	8.35		6.26	28.74

Stab (18).

Ndl. 6.0.
Max. 38.0; 7.80; red. 5.85.
Wdp. 16.0; 2.55; red. 1.91.

8	0.10	0.45	0.08	34.92
10	0.55	0.55	0.41	34.59
12	1.10	0.65	0.83	34.17

14	1.75	0.65	1.31	33.69
16	2.55	0.80	1.91	33.09
18	3.35	0.80	2.51	32.49
20	4.05	0.70	3.04	31.96
22	4.70	0.65	3.53	31.47
24	5.40	0.70	4.05	30.95
26	6.05	0.65	4.54	30.46

Minimalmoment.

Ndl. 4.5.
Max. 30.0; 6.85; red. 5.14.

Beginn 4 h 27 m.
Schluss 4 h 43 m.

Minimalmoment.

Ndl. 4.5.
Max. 35.0; 6.30; red. 4.73.

Maximalmoment.

Ndl. 6.5.
Hub 1.00; red. 0.75.

Minimalmoment.

Ndl. 4.0.
Max. 35.0; 6.20; red. 4.65.

Maximalmoment.

Ndl. 6.0.
Hub 0.95; red. 0.71.

Minimalmoment.

Ndl. 4.0.
Max. 35.0; 6.00; red. 4.50.

Versuch LXI. 17/XI. 88.

Anf.-Sp. 66.42 g.
Muskellänge 41 mm.
Muskelmasse 3.629 g.

Beginn 11 h 2 m.
Schluss 11 h 31 m.

Minimalmoment.

Ndl. 16.5.
Max. 37.5; 15.20; red. 11.40.

Minimalmoment wdh.

Ndl. 16.5.
Max. 34.0; 13.60; red. 10.20.

Minimalmoment wdh.

Ndl. 16.5.
Max. 34.5; 13.30; red. 9.98.

Maximalmoment.

Ndl. 24.0.
Hub 3.30; red. 2.48.

Maximalmoment wdh.

Ndl. 23.5.
Hub 3.45; red. 2.59.

Maximalmoment wdh.

Ndl. 22.5.
Hub 3.90; red. 2.93.

Stab (122).

Ndl. 22.0.
Hub 14.05; red. 10.54.

Stab (122) wdh.

Ndl. 20.0.
Hub 13.80; red. 10.35.

Stab (122) wdh.

Ndl. 21.0.
Hub 13.20; red. 9.90.

Stab (100).

Ndl. 20.5.
Hub 18.00; red. 13.50.

Stab (100) wdh.

Ndl. 20.0.
Hub 18.20; red. 13.65.

Stab (80).

Ndl. 19.5.
Hub 37.25; red. 27.94.

Stab 60.

Ndl. 19.0.
Max. 262.0; 45.95; red. 34.46.
Wdp. 42.0; 9.10; red. 6.83.

20	1.25	0.35	0.94	40.06
22	1.60	0.50	1.20	39.80
24	3.10	0.55	2.33	38.67
26	3.65	0.55	2.74	38.26
28	4.20	0.60	3.15	37.85
30	4.80	0.70	3.60	37.40
32	5.50	0.70	4.13	36.87
34	6.20	0.70	4.65	36.35
36	6.90	0.70	5.18	35.82
38	7.60	0.75	5.70	35.30
40	8.35	0.75	6.26	34.74
42	9.10	0.75	6.83	34.17
44	9.85	0.75	7.39	33.61
46	10.60	0.70	7.95	33.05
48	11.30	0.70	8.48	32.52
50	12.00	0.70	9.00	32.00
52	12.70	0.70	9.53	31.47
54	13.40	0.65	10.05	30.95

56	14.05	0.65	10.54	30.46
58	14.70	0.65	11.03	29.97
60	15.40	0.70	11.55	29.45
62	16.10	0.70	12.08	28.92

Stab (48).

Ndl. 18.5.
Max. 179.5; 40.50; red. 30.38.
Wdp. 37.0; 9.00; red. 6.75.

20	2.10		1.58	39.42
22	2.70	0.60	2.03	38.97
24	3.45	0.75	2.59	38.41
26	4.25	0.80	3.19	37.81
28	5.05	0.80	3.79	37.21
30	5.85	0.80	4.39	36.61
32	6.75	0.90	5.06	35.94
34	7.65	0.90	5.74	35.26
36	8.55	0.90	6.41	34.59
38	9.45	0.90	7.09	33.91
40	10.35	0.90	7.76	33.24
42	11.25	0.90	8.46	32.54
44	12.15	0.90	9.11	31.89
46	12.95	0.80	9.71	31.29
48	13.75	0.80	10.31	30.69

Stab (40).

Ndl. 17.5.
Max. 152.5; 36.25; red. 27.19.
Wdp. 31.0; 7.50; red. 5.63.

20	2.65		1.99	39.01
22	3.45	0.80	2.59	38.41
24	4.30	0.85	3.23	37.77
26	5.20	0.90	3.90	37.10
28	6.10	0.90	4.58	36.42
30	7.00	0.90	5.25	35.75
32	8.00	1.00	6.00	35.00
34	8.90	0.90	6.68	34.32
36	9.80	0.90	7.35	33.65
38	10.70	0.90	8.03	32.97
40	11.60	0.90	8.70	32.30
42	12.50	0.90	9.38	31.62
44	13.40	0.90	10.05	30.95
46	14.30	0.90	10.73	30.27
48	15.20	0.90	11.40	29.60
50	16.10	0.90	12.08	28.92
52	17.00	0.90	12.75	28.25

Stab (36).

Ndl. 17.0.
Max. 111.5; 26.10; red. 19.58(?).
Wdp. 30.0; 6.90; red. 5.18.

14	0.70		0.53	40.47
16	1.20	0.50	0.90	40.10
18	1.85	0.65	1.39	39.61
20	2.55	0.70	1.91	39.09
22	3.30	0.75	2.48	38.52
24	4.20	0.90	3.15	37.85
26	5.10	0.90	3.83	37.17
28	6.00	0.90	4.50	36.50
30	6.90	0.90	5.18	35.82
32	7.80	0.90	5.85	35.15
34	8.70	0.90	6.53	34.47
36	9.60	0.90	7.20	33.80
38	10.50	0.90	7.88	33.12
40	11.30	0.80	8.48	32.52

Stab (32).

Ndl. 17.0.
Max. 92.5; 25.75; red. 19.31.
Wdp. 25.0; 6.95; red. 5.21.

10	0.50		0.38	40.62
12	1.00	0.50	0.75	40.25
14	1.50	0.50	1.13	39.87
16	2.30	0.80	1.73	39.27
18	3.30	1.00	2.48	38.52
20	4.30	1.00	3.23	37.77
22	5.30	1.00	3.98	37.02
24	6.40	1.10	4.80	36.20
26	7.50	1.10	5.63	35.37
28	8.60	1.10	6.45	34.55
30	9.60	1.00	7.20	33.80
32	10.60	1.00	7.95	33.05
34	11.60	1.00	8.70	32.30
36	12.60	1.00	9.45	31.55

Stab (28).

Ndl. 16.5.
Max. 66.0; 23.05; red. 17.29.
Wdp. 21.0; 6.75; red. 5.06.

10	0.70		0.53	40.47
11	1.10	0.40	0.83	40.17
12	1.50	0.40	1.13	39.87
13	2.00	0.50	1.50	39.50
14	2.50	0.50	1.88	39.12
15	3.00	0.50	2.25	38.75
16	3.55	0.55	2.66	38.34
17	4.10	0.55	3.08	37.92
18	4.70	0.60	3.53	37.47
19	5.40	0.70	4.05	36.95
20	6.10	0.70	4.58	36.42
21	6.75	0.65	5.06	35.94
22	7.35	0.60	5.51	35.49
23	8.00	0.65	6.00	35.00
24	8.65	0.65	6.49	34.51
25	9.30	0.65	6.98	34.02
26	9.95	0.65	7.46	33.54
27	10.55	0.60	7.91	33.09
28	11.10	0.55	8.33	32.67
29	11.70	0.60	8.78	32.22
30	12.30	0.60	9.23	31.77

Stab (24).

Ndl. 16.0.
Max. 55.5; 20.95; red. 15.71.
Wdp. 16.5; 5.95; red. 4.46.

8	0.90		0.68	40.32
9	1.30	0.40	0.98	40.02
10	1.80	0.50	1.35	39.65
11	2.35	0.55	1.76	39.24
12	2.95	0.60	2.21	38.79
13	3.60	0.65	2.70	38.30
14	4.25	0.65	3.19	37.81
15	4.95	0.70	3.71	37.29
16	5.60	0.65	4.20	36.80
17	6.30	0.70	4.73	36.27
18	7.00	0.70	5.25	35.75
19	7.70	0.70	5.78	35.22
20	8.40	0.70	6.30	34.70
21	9.10	0.70	6.83	34.17
22	9.70	0.60	7.28	33.72

Stab (18).

Ndl. 11.0.
Max. 41.5; 15.65; red. 11.74.
Wdp. 15.0; 4.70; red. 3.53.

8	0.50		0.38	40.62
10	1.50	1.00	1.13	39.87
12	2.60	1.10	1.95	39.05
14	4.00	1.40	3.00	38.00
16	5.35	1.35	4.01	36.99
18	6.70	1.35	5.03	35.97
20	8.00	1.30	6.00	35.00
22	9.30	1.30	6.98	34.02

Minimalmoment.

Ndl. 11.5.
Max. 29.0; 10.75; red. 8.06.

Reihe der aufsteigenden Trägheitsmomente.

Beginn 2 h 22 m.
Schluss 2 h 59 m.

Minimalmoment.

Ndl. 8.5.
Max. 35.5; 9.80; red. 7.35.

Minimalmoment wdh.

Ndl. 8.5.
Max. 35.0; 9.60; red. 7.20.

Stab (18).

Ndl. 9.5.
Max. 46.5; 13.25; red. 9.94.
Wdp. 20.0; 5.40; red. 4.05.

8	0.40		0.30	40.70
10	0.85	0.45	0.64	40.36
12	1.60	0.75	1.20	39.80
14	2.45	0.85	1.84	39.16
16	3.40	0.95	2.55	38.45
18	4.40	1.00	3.30	37.70
		1.00		

Digitized by Google

20	5.40	1.00	4.05	36.95
22	6.40	1.00	4.80	36.20
24	7.40	1.00	5.55	35.45

Stab (24).

Ndl. 11.0.
Max. 64.0; 17.40; red. 12.83.
Wdp. 23.0; 5.90; red. 4.43.

10	0.50		0.38	40.62
12	1.15	0.65	0.86	40.14
14	1.80	0.65	1.35	39.65
16	2.55	0.75	1.91	39.09
18	3.50	0.95	2.63	38.37
20	4.45	0.95	3.34	37.66
22	5.40	0.95	4.05	36.95
24	6.40	1.00	4.80	36.20
26	7.35	0.95	5.51	35.49
28	8.30	0.95	6.23	34.77
30	9.20	0.90	6.90	34.10

Stab (28).

Ndl. 12.0.
Max. 85.0; 19.50; red. 14.63.
Wdp. 27.0; 5.95; red. 4.46.

12	0.55		0.41	40.59
14	1.05	0.50	0.79	40.21
16	1.65	0.60	1.24	39.76
18	2.25	0.60	1.69	39.31
20	3.00	0.75	2.25	38.75
22	3.80	0.80	2.85	38.15
24	4.60	0.80	3.45	37.55
26	5.50	0.90	4.13	36.87
28	6.40	0.90	4.80	36.20
30	7.30	0.90	5.48	35.52
32	8.15	0.85	6.11	34.89
34	9.00	0.85	6.75	34.25

Stab (32).

Ndl. 11.5.
Max. 105.5; 23.00; red. 17.25.
Wdp. 32.0; 7.55; red. 5.66.

12	0.70		0.53	40.47
14	1.20	0.50	0.90	40.10
16	1.70	0.50	1.28	39.72
18	2.20	0.50	1.65	39.35
20	2.85	0.65	2.14	38.86
22	3.50	0.65	2.63	38.37
24	4.30	0.80	3.23	37.77
26	5.10	0.80	3.83	37.17
28	5.90	0.80	4.43	36.57
30	6.70	0.80	5.03	35.97
32	7.55	0.85	5.66	35.34
34	8.40	0.85	6.30	34.70
36	9.20	0.80	6.90	34.10
38	10.00	0.80	7.50	33.50
40	10.75	0.75	8.06	32.94
		0.75		

42	11.50	0.75	8.63	32.37
44	12.25	0.75	9.19	31.81
46	13.00	0.75	9.75	31.25

Stab (36).

Ndl. 11.0.
Max. 132.0; 25.80; red. 19.35.
Wdp. 36.0; 7.35; red. 5.66.

20	1.80		1.35	39.65
22	2.35	0.55	1.76	39.24
24	3.05	0.70	2.29	38.71
26	3.75	0.70	2.81	38.19
28	4.45	0.70	3.34	37.66
30	5.15	0.70	3.86	37.14
32	5.85	0.70	4.39	36.61
34	6.55	0.70	4.91	36.09
36	7.35	0.80	5.51	35.49
38	8.15	0.80	6.11	34.89
40	8.90	0.75	6.68	34.32
42	9.65	0.75	7.24	33.76
44	10.35	0.70	7.76	33.24
46	11.05	0.70	8.29	32.71
48	11.75	0.70	8.81	32.19
50	12.40	0.65	9.30	31.70

Stab (40).

Ndl. 10.5.
Max. 151.0; 25.35; red. 19.01.
Wdp. 39.0; 7.05; red. 5.29.

20	1.40		1.05	39.95
22	1.85	0.45	1.39	39.61
24	2.30	0.45	1.73	39.27
26	2.85	0.55	2.14	38.86
28	3.45	0.60	2.59	38.41
30	4.05	0.60	3.04	37.96
32	4.65	0.60	3.49	37.51
34	5.35	0.70	4.01	36.99
36	6.00	0.65	4.50	36.50
38	6.70	0.70	5.03	35.97
40	7.40	0.70	5.55	35.45
42	8.05	0.65	6.04	34.96
44	8.70	0.65	6.53	34.47
46	9,35	0.65	7.01	33.99
48	10.00	0.65	7.50	33.50

Stab (48).

Ndl. 10.5.
Max. 216.0; 31.50; red. 23.63.
Wdp. 44.0; 6.80; red. 5.10.

20	1.00		0.75	40.25
22	1.30	0.30	0.98	40.02
24	1.65	0.35	1.24	39.76
26	2.00	0.35	1.50	39.50
28	2.40	0.40	1.80	39.20
30	2.90	0.50	2.18	38.82
32	3.40	0.50	2.55	38.45
		0.55		

34	3.95	0.55	2.96	38.04
36	4.50	0.55	3.38	37.62
38	5.05	0.55	3.79	37.21
40	5.60	0.55	4.20	36.80
42	6.20	0.60	4.65	36.35
44	6.80	0.60	5.10	35.90
46	7.40	0.60	5.55	35.45
48	8.00	0.60	6.00	35.00
50	8.55	0.55	6.41	34.59
52	9.10	0.55	6.83	34.17
54	9.60	0.50	7.20	33.80
56	10.10	0.50	7.58	33.42

Stab (60).

Ndl. 10.0.
Max. 252.0; 21.65; red. 16.24.
Wdp. 52.0; 4.45; red. 3.34.

30	0.95		0.71	40.29
32	1.20	0.25	0.90	40.10
34	1.45	0.25	1.09	39.91
36	1.75	0.30	1.31	39.69
38	2.05	0.30	1.54	39.46
40	2.35	0.30	1.76	39.24
42	2.70	0.35	2.03	38.97
44	3.05	0.35	2.29	38.71
46	3.40	0.35	2.55	38.45
48	3.75	0.35	2.81	38.19
50	4.10	0.35	3.08	37.92
52	4.45	0.35	3.34	37.66
54	4.80	0.35	3.60	37.40
56	5.15	0.35	3.86	37.14
58	5.50	0.35	4.13	36.87
60	5.85	0.35	4.39	36.61
62	6.20	0.35	4.65	36.35
64	6.55	0.35	4.91	36.09
66	6.85	0.30	5.14	35.86
68	7.15	0.30	5.36	35.64
70	7.45	0.30	5.59	35.41
72	7.75	0.30	5.81	35.19
74	8.00	0.25	6.00	35.00

Stab (80).

Ndl. 10.0.
Hub 15.20; red. 11.40.

Stab (100).

Ndl. 9.5.
Hub 9.85; red. 7.39.

Stab (122).

Ndl. 9.5.
Hub 6.25; red. 4.69.

Maximalmoment.

Ndl. 9.5.
Hub 2.15; red. 1.61.

Digitized by Google

Reihe der absteigenden Trägheitsmomente.

Beginn 3 h 5 m.
Schluss 3 h 32 m.

Maximalmoment.

Ndl. 9.5.
Hub 2.15; red. 1.61.

Stab (122).

Ndl. 9.5.
Hub 6.85; red. 5.14.

Stab (100).

Ndl. 9.0.
Hub 15.35; red. 11.51.

Stab (80).

Ndl. 9.0.
Hub 16.85; red. 12.64.

Stab (60).

Ndl. 8.5.
Max. 278.0; 25.80; red. 19.35.
Wdp. 55.0; 5.60; red. 4.20.

20	0.45	0.15	0.34	40.66
22	0.60	0.15	0.45	40.55
24	0.75	0.15	0.56	40.44
26	0.90	0.15	0.68	40.32
28	1.05	0.15	0.79	40.21
30	1.20	0.20	0.90	40.10
32	1.40	0.30	1.05	39.95
34	1.70	0.30	1.28	39.72
36	2.00	0.30	1.50	39.50
38	2.30	0.35	1.73	39.27
40	2.65	0.35	1.99	39.01
42	3.00	0.35	2.25	38.75
44	3.35	0.35	2.51	38.49
46	3.70	0.40	2.78	38.22
48	4.10	0.40	3.08	37.92
50	4.50	0.40	3.38	37.62
52	4.90	0.40	3.68	37.32
54	5.30	0.40	3.98	37.02
56	5.70	0.40	4.28	36.72
58	6.10	0.40	4.58	36.42
60	6.50	0.35	4.88	36.12
62	6.85	0.35	5.14	35.86
64	7.20	0.35	5.40	35.60
66	7.55	0.35	5.66	35.34
68	7.90	0.40	5.93	35.07
70	8.30	0.35	6.23	34.77
72	8.65		6.49	34.51

Stab (48).

Ndl. 8.0.
Max. 179.0; 22.55; red. 15.91.
Wdp. 47.0; 5.70; red. 4.28.

30	1.70	0.45	1.28	39.72
32	2.05	0.45	1.54	39.46
34	2.50	0.50	1.88	39.12
36	3.00	0.50	2.25	38.75
38	3.50	0.50	2.63	38.37
40	4.00	0.50	3.00	38.00
42	4.50	0.45	3.38	37.62
44	4.95	0.50	3.71	37.29
46	5.45	0.45	4.09	36.91
48	5.90	0.50	4.43	36.57
50	6.40	0.50	4.80	36.20
52	6.90	0.50	5.18	35.82
54	7.40	0.45	5.55	35.45
56	7.85	0.45	5.89	35.11
58	8.30	0.40	6.23	34.77
60	8.70	0.45	6.53	34.47
62	9.15	0.45	6.86	34.14
64	9.60		7.20	33.80

Stab (40).

Ndl. 7.5.
Max. 142.0; 21.10; red. 15.83.
Wdp. 38.0; 5.20; red. 3.90.

20	0.75	0.30	0.56	40.44
22	1.05	0.35	0.79	40.21
24	1.40	0.45	1.05	39.95
26	1.85	0.45	1.39	39.61
28	2.30	0.55	1.73	39.27
30	2.85	0.55	2.14	38.86
32	3.40	0.60	2.55	38.45
34	4.00	0.60	3.00	38.00
36	4.60	0.60	3.45	37.55
38	5.20	0.60	3.90	37.10
40	5.80	0.60	4.35	36.65
42	6.40	0.60	4.80	36.20
44	7.00	0.55	5.25	35.75
46	7.55	0.55	5.66	35.34
48	8.10	0.55	6.08	34.92
50	8.65	0.55	6.49	34.51
52	9.20		6.90	34.10

Stab (36).

Ndl. 7.5.
Max. 120.5; 19.85; red. 14.89.
Wdp. 36.0; 5.25; red. 3.94.

20	0.85	0.40	0.64	40.36
22	1.25	0.45	0.94	40.06
24	1.70	0.50	1.28	39.72
26	2.20	0.55	1.65	39.35
28	2.75	0.55	2.06	38.94
30	3.30	0.65	2.48	38.52
32	3.95	0.70	2.96	38.04
34	4.65	0.60	3.49	37.51
36	5.25	0.65	3.94	37.06
38	5.90	0.70	4.43	36.57
40	6.60	0.65	4.95	36.05
42	7.25	0.60	5.44	35.56

		0.60		
44	7.85	0.65	5.89	35.11
46	8.50	0.60	6.38	34.62
48	9.10	0.60	6.83	34.17
50	9.70	0.60	7.28	33.72
52	10.30		7.73	33.27

Stab (32).

Ndl. 7.0.
Max. 96.0; 17.35; red. 13.01.
Wdp. 35.0; 6.25; red. 4.69.

20	1.35	0.50	1.01	39.99
22	1.85	0.60	1.39	39.61
24	2.45	0.65	1.84	39.16
26	3.10	0.65	2.33	38.67
28	3.75	0.70	2.81	38.19
30	4.45	0.65	3.34	37.66
32	5.10	0.75	3.83	37.17
34	5.85	0.75	4.39	36.61
36	6.60	0.75	4.95	36.05
38	7.35	0.70	5.51	36.49
40	8.05	0.70	6.04	34.96
42	8.75	0.60	6.56	34.44
44	9.35	0.65	7.01	33.99
46	10.00	0.65	7.50	33.50
48	10.65		7.99	33.01

Stab (28).

Ndl. 7.0.
Max. 78.5; 15.50; red. 11.63.
Wdp. 30.0; 5.30; red. 3.98.

16	0.80	0.45	0.60	40.40
18	1.25	0.45	0.94	40.06
20	1.70	0.65	1.28	39.72
22	2.35	0.70	1.76	39.24
24	3.05	0.75	2.29	38.71
26	3.80	0.70	2.85	38.15
28	4.50	0.80	3.38	37.62
30	5.30	0.80	3.98	37.02
32	6.10	0.75	4.58	36.42
34	6.85	0.70	5.14	35.86
36	7.55	0.75	5.66	35.34
38	8.30	0.75	6.23	34.77
40	9.05		6.79	34.21

Stab (24).

Ndl. 6.5.
Max. 63.0; 12.95; red. 9.71.
Wdp. 27.0; 4.70; red. 3.53.

14	0.45	0.35	0.34	40.66
16	0.80	0.55	0.60	40.40
18	1.35	0.65	1.01	39.99
20	2.00	0.70	1.50	39.50
22	2.70	0.80	2.03	38.97
24	3.50	0.80	2.63	38.37
26	4.30	0.80	3.23	37.77
28	5.10	0.80	3.83	37.17
30	5.90	0.80	4.43	36.57
32	6.70		5.03	35.97

Digitized by Google

Stab (18).

Ndl. 6.5.
Max. 11.5; 9.80; red. 7.35.
Wdp. 19.0; 3.55; red. 2.66.

10	0.20	0.20	0.15	40.85
11	0.40	0.30	0.30	40.70
12	0.70	0.35	0.53	40.47
13	1.05	0.35	0.79	40.21
14	1.40	0.40	1.05	39.95
		0.40		
15	1.80	0.40	1.35	39.65
16	2.20	0.45	1.65	39.35
17	2.65	0.45	1.99	39.01
18	3.10	0.45	2.33	38.67
19	3.55	0.45	2.66	38.34
20	4.00	0.45	3.00	38.00
21	4.45	0.45	3.34	37.66
22	4.90		3.68	37.32

Minimalmoment.

Ndl. 6.0.
Max. 33.0; 8.90; red. 6.68.

Maximalmoment.

Ndl. 8.0.
Hub 2.10; red. 1.58.

---

2. Versuche mit constantem Trägheitsmoment und variabeler Anfangsspannung.

A. Begonnen mit der Reihe der aufsteigenden Anfangsspannungen.

Versuch XLVII. 3/XI. 88.

Minimalmoment.

Muskellänge 45 mm.
Muskelmasse 5.710 g.

Beginn 11 h 38 m.
Schluss 12 h 50 m.

Reihe der aufsteigenden Anfangsspannungen.

Anf.-Sp. 10.97.

Ndl. 9.5.
Max. 32.5; 20.85; red. 15.64.
Wdp. 10.0; 7.80; red. 5.85.
Arb. 171.57.

3	0.35	0.65	0.26	44.74
4	1.00	1.00	0.75	44.25
5	2.00	1.10	1.50	43.50
6	3.10	1.15	2.33	42.67
7	4.25	1.15	3.19	41.81
8	5.40	1.20	4.05	40.95
9	6.60	1.20	4.95	40.05
10	7.80	1.20	5.85	39.15
11	9.00	1.20	6.75	38.25
12	10.20	1.00	7.65	37.35
13	11.20	1.00	8.40	36.60
14	12.20	1.00	9.15	35.85
15	13.20	0.90	9.90	35.10
16	14.10	0.90	10.58	34.42
17	15.00	0.90	11.25	33.75
18	15.90	0.80	11.93	33.07
19	16.70	0.80	12.53	32.47
20	17.50		13.13	31.87

Anf.-Sp. 10.97 wdh.

Ndl. ?
Max. 33.0; 20.70; red. 15.53.
Wdp. 11.5; 8.40; red. 6.30.
Arb. 170.36.

5	1.10	1.10	0.83	44.17
6	2.20	1.10	1.65	43.35
7	3.30	1.10	2.48	42.52
8	4.40	1.10	3.30	41.70
9	5.50	1.10	4.13	40.87
10	6.60	1.20	4.95	40.05
11	7.80	1.20	5.85	39.15
12	9.00	1.10	6.75	38.25
13	10.10	1.00	7.58	37.42
14	11.10	1.00	8.33	36.67
15	12.10	0.95	9.08	35.92
16	13.05	0.95	9.79	35.21
17	14.00		10.50	34.50

Anf.-Sp. 21.88.

Ndl. 10.0.
Max. 26.5; 17.10; red. 12.83.
Wdp. 10.0; 6.40; red. 4.80.
Arb. 280.72.

5	1.25	0.95	0.94	44.06
6	2.20	1.00	1.65	43.35
7	3.20	1.05	2.40	42.60
8	4.25	1.05	3.19	41.81
9	5.30	1.10	3.98	41.02
10	6.40	1.10	4.80	40.20
11	7.50	1.05	5.63	39.37
12	8.55	1.05	6.41	38.59
13	9.60	0.95	7.20	37.80
14	10.55	0.95	7.91	37.09
15	11.50		8.63	36.37

Anf.-Sp. 33.37.

Ndl. 11.5.
Max. 26.0; 16.20; red. 12.15.
Arb. 405.45.

Anf.-Sp. 44.18.

Ndl. 12.5.
Max. 27.0; 15.25; red. 11.44.
Arb. 505.42.

Anf.-Sp. 55.45.

Ndl. 14.0.
Max. 26.0; 16.05; red. 12.04.
Arb. 667.62.

Anf.-Sp. 55.45 wdh.

Ndl. 14.0.
Max. 26.5; 15.55; red. 11.66.
Arb. 646.55.

Anf.-Sp. 66.42.

Ndl. 14.5.
Max. 27.0; 14.00; red. 10.50.
Arb. 697.41.

Anf.-Sp. 88.82.

Ndl. 14.0.
Max. 27.0; 13.45; red. 10.09.
Arb. 896.19.

Anf.-Sp. 110.60.

Ndl. 13.0.
Max. 26.0; 12.70; red. 9.53.
Arb. 1054.02.

Anf.-Sp. 133.00.

Ndl. 12.5.
Max. 27.0; 13.00; red. 9.75.
Arb. 1296.75.

Anf.-Sp. 133.00 wdh.

Ndl. ?
Max. 26.5; 12.45; red. 9.34.
Arb. 1242.22.

Anf.-Sp. 165.85.

Ndl. 12.0.
Max. 27.0; 10.40; red. 7.80.
Arb. 1293.63.

Digitized by Google

Anf.-Sp. 165.85 wdh.
Ndl. ?
Max. 26.5; 10.40; red. 7.80.
Arb. 1293.63.

Reihe der absteigenden Anfangsspannungen.

Anf.-Sp. 165.85.
Ndl. 12.5.
Max. 26.5; 10.55; red. 7.91.
Arb. 1311.87.

Anf.-Sp. 133.00.
Ndl. 13.0.
Max. 26.0; 11.45; red. 8.59.
Arb. 1142.47.

Anf.-Sp. 133.00 wdh.
Ndl. 13.0.
Max. 26.5; 11.50; red. 8.63.
Arb. 1147.79.

Anf.-Sp. 110.60.
Ndl. 13 0.
Max. 27.5; 12.70; red. 9.53.
Arb. 1054.02.

Anf.-Sp. 88.82.
Ndl. 12.0.
Max. 27.0; 13.45; red. 10.09.
Arb. 896.19.

Anf.-Sp. 66.42.
Ndl. 12.0.
Max. 27.5; 13.30; red. 9.98.
Arb. 640.72.

Anf.-Sp. 55.45.
Ndl. 11.0.
Max. 27.5; 14.25; red. 10.69.
Arb. 592.76.

Anf.-Sp. 44.18.
Ndl. 10.0.
Max. 28.5; 16.10; red. 12.08!
Arb. 533.69.

Anf.-Sp. 33.37.
Ndl. 8.0.
Max. 26.5; 14.40; red. 10.80.
Arb. 360.40.

Anf.-Sp. 21.88.
Ndl. 7.0.
Max. 27.5; 14.15; red. 10.61.
Arb. 232.15.

Anf.-Sp. 10.97.
Ndl. 7.0.
Max. 28.5; 16.10; red. 12.08.
Arb. 132.52.

Versuch XLVIII. 5/XI. 88.

Trägheitsmoment Stab (28).
Muskellänge 37 mm.
Muskelmasse 2.913 g.

Reihe der aufsteigenden Anfangsspannungen.

Anf.-Sp. 21.88.
Ndl. 15.0.
Max. 176.0; 64.25; red. 48.19.
Wdp. 31.0; 11.70; red. 8.78.
Arb. 1054.40.

10	0.70		0.53	36.47
12	1.20	0.50	0.90	36.10
14	2.00	0.80	1.50	35.50
16	2 85	0.85	2.14	34 86
18	3.80	0.95	2.85	34.15
20	5.00	1.20	3.75	33.25
22	6.20	1.20	4.65	32.35
24	7.40	1.20	5.55	31.45
26	8.65	1.25	6.49	30.51
28	9.85	1.20	7.39	29.61
30	11.10	1.25	8.33	28.67
32	12.30	1.20	9.23	27.77
34	13.55	1.25	10.16	26.84
36	14.80	1.25	11.10	25.90
38	16.05	1.25	12.04	24.96
40	17.25	1.20	12.94	24.06
42	18.40	1.15	13.80	23.20
44	19.50	1.10	14.63	22.37
46	20.60	1.10	15.45	21.55
48	21.75	1.15	16.31	20.69
50	22.90	1.15	17.18	19.82
52	24 00	1.10	18.00	19.00
54	25.10	1.10	18.83	18.17
56	26.15	1.05	19.61	17.39
58	27.20	1.05	20.40	16.60
60	28.20	1.00	21.15	15.85

Anf.-Sp. 21.88 wdh.
Ndl. 15.5.
Max. 172.0; 63.10; red. 47.33.
Wdp. ?
Arb. 1035.38.

10	0.55		0.41	36.59
12	1.05	0.50	0.79	36.21
14	1.70	0.65	1.28	35 72
16	2.40	0.70	1.80	35.20
18	3.40	1.00	2.85	34.45
20	4.45	1.05	3.34	33.66
		1.10		
		1.40		
22	5.55	1.25	4.16	32.84
24	6.80	1.25	5.10	31.90
26	8.05	1.20	6.04	30.96
28	9.25	1.20	6.94	30.06
30	10.45	1.20	7 84	29.16
32	11.65	1.10	8.74	28.26
34	12.75	1.10	9.56	27.44
36	13.85	1.10	10.39	26.61
38	14.95	1.30	11.21	25.79
40	16.25	1.25	12.19	24.81
42	17.50	1.25	13.13	23.87
44	18.75	1.10	14.06	22.94
46	19.85	1.15	14.89	22.11
48	21.00	1.10	15.75	21.25
50	22.10		16.58	20 12

Anf.-Sp. 33.37.
Ndl. 17.0.
Max. 165.5; 49.50; red. 37.13.
Wdp. 30.0; 9.60; red. 7.20.
Arb. 1239.03.

10	0.45		0.34	36.66
12	0.75	0.30	0.56	36.44
14	1.30	0.55	0.98	36.02
16	2.00	0.70	1.50	35.50
18	2.90	0.90	2.18	34.82
20	3.85	0.95	2.89	34.11
22	4.90	1.05	3.68	33.32
24	6.10	1.20	4.58	32.42
26	7.25	1.15	5.44	31.56
28	8.40	1.15	6.30	30.70
30	9.60	1.20	7.20	29.80
32	10.80	1.20	8.10	28.90
34	11.95	1.15	8.96	28.04
36	13.10	1.15	9.83	27.17
38	14.30	1.20	10.73	26.27
40	15.40	1.10	11.55	25.45
42	16.50	1.10	12.38	24.62
44	17.50	1.00	13.13	23.87
46	18.60	1.10	13.95	23.05
48	19.65	1.05	14.74	22.26
50	20.60	0.95	15.45	21.55

Anf.-Sp. 44.18.
Ndl. 18.0.
Max. 131.5; 39.60; red. 29.70.
Wdp. 28.0; 8 90; red. 6.68.
Arb. 1312.15.

10	0.50		0.38	36.62
12	1.00	0.50	0.75	36.25
14	1.55	0.55	1.16	35.84
16	2.30	0.75	1.73	35.27
18	3.20	1.90	2.40	34.60
20	4.25	1.05	3.19	33.81
22	5.35	1.10	4.01	32.99
24	6.50	1.15	4.88	32.12
		1.20		

Digitized by Google

26	7.70	1.20	5.78	31.22
28	8.90	1.20	6.68	30.32
30	10.00	1.10	7.50	29.50
32	11.20	1.20	8.40	28.60
34	12.35	1.15	9.26	27.74
36	13.45	1.10	10.09	26.91
38	14.55	1.10	10.91	26.09
40	15.65	1.10	11.74	25.26
42	16.75	1.10	12.56	24.44
44	17.75	1.00	13.31	23.69
46	18.75	1.00	14.06	22.94
48	19.75	1.00	14.81	22.19
50	20.75	1.00	15.56	21.44

Anf.-Sp. 55.45.
Ndl. 18.5.
Max. 114.5; 32.85; red. 24.64.
Wdp. 24.0; 6.20; red. 4.65.
Arb. 1366.29.

10	0.45		0.34	36.66
12	0.95	0.50	0.71	36.29
14	1.50	0.55	1.13	35.87
16	2.15	0.65	1.61	35.39
18	3.05	0.90	2.29	34.71
20	4.00	0.95	3.00	34.00
22	5.10	1.10	3.83	33.17
24	6.20	1.10	4.65	32.35
26	7.30	1.10	5.48	31.52
28	8.40	1.10	6.30	30.70
30	9.45	1.05	7.09	29.91
32	10.50	1.05	7.88	29.12
34	11.55	1.05	8.66	28.34
36	12.60	1.05	9.45	27.55
38	13.65	1.05	10.24	26.76
40	14.70	1.05	11.03	25.97

Anf.-Sp. 66.42.
Ndl. 18.5.
Max. 102.0; 28.35; red. 21.26.
Wdp. 25.0; 6.55; red. 4.91.
Arb. 1412.09.

10	0.40		0.30	36.70
12	0.85	0.45	0.64	36.36
14	1.40	0.55	1.05	35.95
16	2.05	0.65	1.54	35.46
18	2.85	0.80	2.14	34.86
20	3.85	1.00	2.89	34.11
22	4.90	1.05	3.68	33.32
24	6.00	1.10	4.50	32.50
26	7.10	1.10	5.33	31.67
28	8.20	1.10	6.15	30.85
30	9.20	1.00	6.90	30.10
32	10.20	1.00	7.65	29.35
34	11.20	1.00	8.40	28.60
36	12.20	1.00	9.15	27.85
38	13.20	1.00	9.90	27.10
40	14.20	1.00	10.65	26.35

Anf.-Sp. 88.82.
Ndl. 17.0.
Max. 79.5; 22.25; red. 16.69.
Wdp. 24.0; 6.20; red. 4.65.
Arb. 1482.41.

10	0.50		0.38	36.62
12	0.90	0.40	0.68	36.32
14	1.50	0.60	1.13	35.87
16	2.25	0.75	1.69	35.31
18	3.10	0.85	2.33	34.67
20	4.00	0.90	3.00	34.00
22	5.10	1.10	3.83	33.17
24	6.20	1.10	4.65	32.35
26	7.30	1.10	5.48	31.52
28	8.40	1.10	6.30	30.70
30	9.40	1.00	7.05	29.95

Anf.-Sp. 110.60.
Ndl. 17.5.
Max. 73.0; 20.85; red. 15.64.
Wdp. 24.0; 6.20; red. 4.55.
Arb. 1729.78.

10	0.60		0.45	36.55
12	1.00	0.40	0.75	36.25
14	1.55	0.55	1.16	35.84
16	2.35	0.80	1.76	35.24
18	3.15	0.80	2.36	34.64
20	4.15	1.00	3.11	33.89
22	5.20	1.05	3.90	33.10
24	6.20	1.00	4.65	32.35
26	7.25	1.05	5.44	31.56
28	8.25	1.00	6.19	30.81
30	9.35	1.10	7.01	29.99
32	10.40	1.05	7.80	29.20
34	11.40	1.00	8.55	28.45

Anf.-Sp. 133.00.
Ndl. 16.5.
Max. 64.0; 16.65; red. 12.49.
Wdp. 24.0; 5.55; red. 4.16.
Arb. 1661.17.

10	0.50		0.38	36.62
12	0.85	0.35	0.64	36.36
14	1.40	0.55	1.05	35.95
16	2.00	0 60	1.50	35.50
18	2.75	0.75	2.06	34.94
20	3.65	0.90	2.74	34.26
22	4.60	0.95	3.45	33.55
24	5.55	0.95	4.16	32.84
26	6.50	0.95	4.88	32.12
28	7.45	0.95	5.59	31.41
30	8.35	0.90	6.26	30.74

Anf.-Sp. 165.85.
Ndl. 16.0.
Max. 48.0; 15.45; red. 11.59.
Wdp. 19.0; 5.30; red. 3.98.
Arb. 1922.20.

6	0.45		0.34	36.66
8	0.75	0.30	0.56	36.44
10	1.15	0.40	0.86	36.14
12	1.80	0.65	1.35	35.65
14	2.70	0.90	2.03	34.97
16	3.65	0.95	2.74	34.26
18	4.65	1.00	3.49	33.51
20	5.80	1.15	4.35	32.65
22	6.80	1.00	5.10	31.90

Reihe der absteigenden Anfangsspannungen.

Beginn 12 h 25 m.
Schluss 12 h 50 m.

Anf.-Sp. 165.85.
Ndl. 15.5.
Max. 59.5; 14.45; red. 10.84.
Wdp. 25.0; 5.00; red. 3.75.
Arb. 1797.81.

16	1.50		1.13	35.87
18	2.05	0.55	1.54	35.46
20	2.75	0.70	2.06	34.94
22	3.60	0.85	2.70	34.30
24	4.50	0.90	3.38	33.62
26	5.45	0.95	4.09	32.91
28	6.35	0.90	4.76	32.24
30	7.25	0.90	5.44	31.56
32	8.10	0.85	6.08	30.92
34	9.00	0.90	6.75	30.25
36	9.80	0.80	7.35	29.65
38	10.50	0.70	7.88	29.12
40	11.20	0.70	8.40	28.60

Anf.-Sp. 165.85 wdh.
Ndl. 16.0.
Max. 56.5; 13.30; red. 9.98.
Wdp. 24.0; 4.90; red. 3.68.
Arb. 1655.18.

10	0.35		0.26	36.74
12	0.70	0.35	0.53	36.47
14	1.20	0.50	0.90	36.10
16	1.80	0.60	1.35	35.65
18	2.45	0.65	1.84	35.16
20	3.20	0.75	2.40	34.60
22	4.00	0.80	3.00	34.00
24	4.90	0.90	3.68	33.32
26	5.80	0.90	4.35	32.65
28	6.60	0.80	4.95	32.05
30	7.40	0.80	5.55	31.45
32	8.20	0.80	6.15	30.85
34	9.00	0.80	6.75	30.25

Anf.-Sp. 133.00.
Ndl. 16.0.
Max. 62.0; 15.80; red. 11.85.
Wdp. 23.0; 5.20; red. 3.90.
Arb. 1576.05.

Digitized by Google

14	1.65	0.65	1.24	35.76
16	2.30	0.70	1.73	35.27
18	3.00	0.80	2.25	34.75
20	3.80	0.90	2.85	34.15
22	4.70	1.00	3.53	33.47
24	5.70	0.95	4.28	32.72
26	6.65	0.95	4.99	32.01
28	7.60	0.85	5.70	31.30
30	8.45	0.85	6.34	30.66
32	9.30	0.80	6.98	30.02
34	10.10		7.58	29.42

Anf.-Sp. 110.60.
Ndl. 16.0.
Max. 66.5; 17.20; red. 12.90.
Wdp. 27.0; 7.00; red. 5.25.
Arb. 1326.74.

16	2.10	0.80	1.58	35.42
18	2.90	0.80	2.18	34.82
20	3.70	0.95	2.78	34.22
22	4.65	0.95	3.49	33.51
24	5.60	0.90	4.20	32.80
26	6.50	1.00	4.88	32.12
28	7.50	0.95	5.63	31.37
30	8.45	0.95	6.34	30.66
32	9.40	0.80	7.05	29.95
34	10.20	0.80	7.65	29.35
36	11.00		8.25	28.75

Anf.-Sp. 88.82.
Ndl. 15.5.
Max. 76.0; 20.00; red. 15.00.
Wdp. 25.0; 6.50; red. 4.88.
Arb. 1332.30.

16	2.10	0.90	1.58	35.42
18	3.00	0.90	2.25	34.75
20	3.90	0.95	2.93	34.07
22	4.95	1.05	3.71	33.29
24	6.00	1.00	4.50	32.50
26	7.00	0.95	5.25	31.75
28	7.95	0.95	5.96	31.04
30	8.90	0.90	6.68	30.32
32	9.80	0.90	7.35	29.65
34	10.70	0.90	8.03	28.97
36	11.60	0.90	8.70	28.30
38	12.50		9.38	27.62

Anf.-Sp. 66.42.
Ndl. 14.5.
Max. 97.0; 25.00; red. 18.75.
Wdp. 28.0; 6.60; red. 4.95.
Arb. 1245.38.

20	2.60	1.00	1.95	35.05
22	3.60	1.00	2.70	34.30
24	4.60	1.00	3.45	33.55
26	5.60	1.00	4.20	32.80

28	6.60	1.00	4.95	32.05
30	7.60	1.00	5.70	31.30
32	8.60	1.00	6.45	30.55
34	9.60	1.00	7.20	29.80
36	10.60	1.00	7.95	29.05

Anf.-Sp. 55.45.
Ndl. 14.0.
Max. 107.0; 30.70; red. 23.03.
Wdp. 27.0; 7.85; red. 5.89.
Arb. 1277.01.

16	2.20	0.85	1.65	35.35
18	3.05	1.00	2.29	34.71
20	4.05	1.05	3.04	33.96
22	5.10	1.10	3.83	33.17
24	6.20	1.10	4.65	32.35
26	7.30	1.10	5.48	31.52
28	8.40	1.10	6.30	30.70
30	9.50	1.10	7.13	29.87
32	10.60	1.05	7.95	29.05
34	11.65	1.05	8.74	28.26
36	12.70	1.00	9.53	27.47
38	13.70	1.00	10.28	26.72
40	14.70	1.00	11.03	25.97
42	15.70		11.78	25.22

Anf.-Sp. 44.18.
Ndl. 12.5.
Max. 119.0; 31.80; red. 23.85.
Wdp. 30.0; 8.45; red. 6.34.
Arb. 1053.69.

16	1.50	0.80	1.13	35.87
18	2.30	0.95	1.73	35.27
20	3.25	1.05	2.44	34.56
22	4.30	1.00	3.23	33.77
24	5.30	1.05	3.98	33.02
26	6.35	1.05	4.76	32.24
28	7.40	1.05	5.55	31.45
30	8.45	1.00	6.34	30.66
32	9.45	1.05	7.09	29.91
34	10.50	1.00	7.88	29.12
36	11.50	1.00	8.63	28.37
38	12.50	1.00	9.38	27.62
40	13.50	0.95	10.13	26.87
42	14.45	0.95	10.84	26.16
44	15.40	0.85	11.55	25.45
46	16.25		12.19	24.81

Anf.-Sp. 33.37.
Ndl. 11.5.
Max. 137.5; 33.95; red. 25.46.
Wdp. 29.0; 7.30; red. 5.48.
Arb. 849.60.

16	1.60	0.70	1.20	35.80
18	2.30	0.80	1.73	35.27
20	3.10	0.90	2.33	34.67
22	4.00	0.90	3.00	34.00
24	4.90	0.90	3.68	33.32
26	5.80	1.00	4.35	32.65
28	6.80	1.00	5.10	31.90
30	7.80	1.00	5.85	31.15
32	8.80	0.90	6.60	30.40
34	9.70	0.95	7.28	29.72
36	10.65	0.95	7.99	29.01
38	11.60	0.90	8.70	28.30
40	12.50	0.90	9.38	27.62
42	13.40	0.90	10.05	26.95
44	14.30	0.80	10.73	26.27
46	15.10	0.80	11.33	25.67
48	15.90		11.93	25.07

Anf.-Sp. 21.88.
Ndl. 11.0.
Max. 181.0; 45.50; red. 34.13.
Wdp. 30.0; 8.00; red. 6.00.
Arb. 746.76.

16	1.60	0.70	1.20	35.80
18	2.30	0.80	1.73	35.27
20	3.10	0.90	2.33	34.67
22	4.00	1.00	3.00	34.00
24	5.00	1.00	3.75	33.25
26	6.00	1.00	4.50	32.50
28	7.00	1.00	5.25	31.75
30	8.00	1.00	6.00	31.00
32	9.00	1.00	6.75	30.25
34	10.00	1.00	7.50	29.50
36	11.00	1.00	8.25	28.75
38	12.00	0.90	9.00	28.00
40	12.90	0.90	9.68	27.32
42	13.80		10.35	26.65

Versuch L. 7/XI. 88.

Trägheitsmoment Stab (28).

Muskellänge 34 mm.
Muskelmasse 3.099 g.

Muskel erst gereizt nach $4\frac{1}{2}$-stündigem Hängen in der feuchten Kammer.

Reihe der aufsteigenden Anfangsspannungen.

Beginn 2 h 58 m.
Schluss 3 h 27 m.

Anf.-Sp. 21.88 g.
Ndl. 8.5.
Max. 163.0; 32.00; red. 24.00.
Wdp. 31.0; 5.95; red. 4.46.
Arb. 525.12.

10	0.20	0.20	0.15	33.85
12	0.40	0.20	0.30	33.70
14	0.60	0.30	0.45	33.55
16	0.90	0.50	0.68	33.32
18	1.40	0.60	1.05	32.95
20	2.00	0.60	1.50	32.50
22	2.60	0.70	1.95	32.05
24	3.30	0.70	2.48	31.52
26	4.00	0.75	3.00	31.00
28	4.75	0.75	3.56	30.44
30	5.50	0.85	4.13	29.87
32	6.35	0.75	4.76	29.24
34	7.10	0.80	5.33	28.67
36	7.90	0.80	5.93	28.07
38	8.70	0.75	6.53	27.47
40	9.45	0.75	7.09	26.91
42	10.20	0.70	7.65	26.35
44	10.90	0.70	8.18	25.82
46	11.60	0.70	8.70	25.30
48	12.30	0.70	9.23	24.77
50	13.00	0.65	9.75	24.25
52	13.65	0.65	10.24	23.76
54	14.30	0.65	10.73	23.27
56	14.95	0.65	11.21	22.79
58	15.60	0.60	11.70	22.30
60	16.20		12.15	21.85

Anf.-Sp. 33.37.

Ndl. 9.5.
Max. 111.5; 21.70; red. 16.28.
Wdp. 31.0; 5.55; red. 4.16.
Arb. 543.26.

10	0.15	0.15	0.11	33.89
12	0.30	0.20	0.23	33.77
14	0.50	0.30	0.38	33.62
16	0.80	0.50	0.60	33.40
18	1.30	0.55	0.98	33.02
20	1.85	0.60	1.39	32.61
22	2.45	0.65	1.84	32.16
24	3.10	0.65	2.33	31.67
26	3.75	0.70	2.81	31.19
28	4.45	0.75	3.34	30.66
30	5.20	0.70	3.90	30.10
32	5.90	0.75	4.43	29.57
34	6.65	0.70	4.99	29.01
36	7.35	0.75	5.51	28.49
38	8.10	0.65	6.08	27.92
40	8.75	0.70	6.56	27.44
42	9.45	0.65	7.09	26.91
44	10.10	0.65	7.58	26.42
46	10.75	0.65	8.06	25.94
48	11.40	0.60	8.55	25.45
50	12.00		9.00	25.00

Anf.-Sp. 33.37 wdh.

Ndl. 9.5.
Max. 110.0; 22.90; red. 17.18.
Wdp. 30.0; 6.25; red. 4.69.
Arb. 573.30.

10	0.20	0.25	0.15	33.85
12	0.45	0.25	0.34	33.66
14	0.70	0.45	0.53	33.47
16	1.15	0.45	0.86	33.14
18	1.60	0.65	1.20	32.80
20	2.25	0.75	1.69	32.31
22	3.00	0.75	2.25	31.75
24	3.75	0.85	2.81	31.19
26	4.60	0.90	3.45	30.55
28	5.50	0.75	4.13	29.87
30	6.25	0.80	4.69	29.31
32	7.05	0.80	5.29	28.71
34	7.85	0.85	5.89	28.11
36	8.70	0.85	6.53	27.47
38	9.55	0.80	7.16	26.84
40	10.35	0.75	7.76	26.24
42	11.10	0.70	8.33	25.67
44	11.80	0.70	8.85	25.15
46	12.50		9.38	24.62

Anf.-Sp. 44.18.

Ndl. 11.0.
Max. 84.5; 14.65; red. 10.99.
Wdp. 30.0; 5.30; red. 3.98.
Arb. 485.54.

10	0.20	0.20	0.15	33.85
12	0.40	0.20	0.30	33.70
14	0.60	0.30	0.45	33.55
16	0.90	0.45	0.68	33.32
18	1.35	0.55	1.01	32.99
20	1.90	0.65	1.43	32.57
22	2.55	0.65	1.91	32.09
24	3.20	0.70	2.40	31.60
26	3.90	0.70	2.93	31.07
28	4.60	0.70	3.45	30.55
30	5.30	0.70	3.98	30.02
32	6.00	0.70	4.50	29.50
34	6.70	0.70	5.03	28.97
36	7.40	0.70	5.55	28.45
38	8.10	0.65	6.08	27.92
40	8.75	0.65	6.56	27.44
42	9.40	0.60	7.05	26.95
44	10.00	0.50	7.50	26.50
46	10.50	0.50	7.88	26.12
48	11.00	0.50	8.25	25.75
50	11.50		8.63	25.37

Anf.-Sp. 55.45.

Ndl. 12.0.
Max. 74.5; 13.00; red. 9.75.
Wdp. 30.0; 5.10; red. 3.83.
Arb. 540.64.

10	0.15	0.15	0.11	33.89
12	0.30	0.25	0.23	33.77
		0.25		
14	0.55	0.35	0.41	33.59
16	0.90	0.45	0.68	33.32
18	1.35	0.55	1.01	32.99
20	1.90	0.60	1.43	32.57
22	2.50	0.60	1.88	32.12
24	3.10	0.65	2.33	31.67
26	3.75	0.70	2.81	31.19
28	4.45	0.55	3.34	30.66
30	5.10	0.65	3.83	30.17
32	5.75	0.70	4.31	29.69
34	6.45	0.60	4.84	29.16
36	7.05	0.60	5.29	28.71
38	7.65	0.60	5.74	28.26
40	8.25	0.55	6.19	27.81
42	8.80	0.50	6.60	27.40
44	9.30	0.45	6.98	27.02
46	9.75	0.45	7.31	26.69
48	10.20	0.40	7.65	26.35
50	10.60		7.95	26.05

Anf.-Sp. 66.42.

Ndl. 11.0.
Max. 61.5; 11.00; red. 8.25.
Wdp. 30.0; 5.00; red. 3.75.
Arb. 547.97.

12	0.30	0.20	0.23	33.77
14	0.50	0.35	0.38	33.62
16	0.85	0.45	0.64	33.36
18	1.30	0.50	0.98	33.02
20	1.80	0.60	1.35	32.65
22	2.40	0.65	1.80	32.20
24	3.05	0.65	2.29	31.71
26	3.70	0.65	2.78	31.22
28	4.35	0.65	3.26	30.74
30	5.00	0.65	3.75	30.25
32	5.65	0.65	4.24	29.76
34	6.30	0.65	4.73	29.27
36	6.95	0.65	5.21	28.79
38	7.60	0.60	5.70	28.30
40	8.20		6.15	27.85

Anf.-Sp. 88.82.

Ndl. 11.0.
Max. 55.0; 9.70; red. 7.28.
Wdp. 28.0; 4.50; red. 3.38.
Arb. 646.61.

10	0.25	0.25	0.19	33.81
12	0.50	0.30	0.38	33.62
14	0.80	0.30	0.60	33.40
16	1.10	0.45	0.83	33.17
18	1.55	0.55	1.16	32.84
20	2.10	0.55	1.58	32.42
22	2.65	0.65	1.99	32.01
24	3.30	0.60	2.48	31.52
26	3.90	0.60	2.93	31.07
28	4.50	0.60	3.38	30.62

Digitized by Google

		0.60		
30	5.40		3.83	30.17
		0.60		
32	5.70		4.28	29.72
		0.60		
34	6.30		4.73	29.27
		0.60		
36	6.90		5.18	28.82
		0.50		
38	7.40		5.55	28.45
		0.50		
40	7.90		5.93	28.07

Anf.-Sp. 110.60.
Ndl. 10.0.
Max. 49.0; 8.20; red. 6.15.
Wdp. 24.0; 3.50; red. 2.63.
Arb. 680.19.

13	0.70		0.53	33.47
		0.15		
14	0.85		0.64	33.36
		0.20		
15	1.05		0.79	33.21
		0.25		
16	1.30		0.98	33.02
		0.25		
17	1.55		1.16	32.84
		0.25		
18	1.80		1.35	32.65
		0.25		
19	2.05		1.54	32.46
		0.25		
20	2.30		1.73	32.27
		0.30		
21	2.60		1.95	32.05
		0.30		
22	2.90		2.18	31.82
		0.30		
23	3.20		2.40	31.60
		0.30		
24	3.50		2.63	31.37
		0.30		
25	3.80		2.85	31.15
		0.30		
26	4.10		3.08	30.92
		0.30		
27	4.40		3.30	30.70
		0.25		
28	4.65		3.49	30.51
		0.30		
29	4.95		3.71	30.29
		0.25		
30	5.20		3.90	30.10
		0.25		
31	5.45		4.09	29.91
		0.25		
32	5.70		4.28	29.72
		0.30		
33	6.00		4.50	29.50
		0.25		
34	6.25		4.69	29.31
		0.25		
35	6.50		4.88	29.12

Anf.-Sp. 133.00.
Ndl. 10.0.
Max. 40.0; 8.75(!); red. 6.56.
Wdp. 20.0; 3.70; red. 2.78.
Arb. 872.48.

8	0.10		0.08	33.92
		0.20		
9	0.30		0;23	33.77
		0.20		
10	0.50		0.38	33.62
		0.20		
11	0.70		0.53	33.47
		0.20		
12	0.90		0.68	33.32
		0.30		
13	1.20		0.90	33.10
		0.30		
14	1.50		1.13	32.87
		0.30		
15	1.80		1.35	32.65
		0.35		
16	2.15		1.61	32.39
		0.35		
17	2.60		1.95	32.05
		0.40		
18	3.00		2.25	31.75
		0.35		
19	3.35		2.51	31.49
		0.35		
20	3.70		2.78	31.22
		0.40		
21	4.10		3.08	30.92
		0.40		
22	4.50		3.38	30.62
		0.40		

		0.40		
23	4.90		3.68	30.32
		0.35		
24	5.25		3.94	30.06
		0.35		
25	5.60		4.20	29.80
		0.35		
26	5.95		4.46	29.54
		0.35		
27	6.30		4.73	29.27
		0.30		
28	6.60		4.95	29.05
		0.30		
29	6.90		5.18	28.82
		0.30		
30	7.20		5.40	28.60

Anf.-Sp. 165.85.
Ndl. 10.0.
Max. 39.0; 7.20; red. 5.40.
Wdp. 19.0; 2.85; red. 2.14.
Arb. 895.59.

8	0.10		0.08	33.92
		0.20		
9	0.30		0.23	33.77
		0.20		
10	0.50		0.38	33.62
		0.20		
11	0.70		0.53	33.47
		0.20		
12	0.90		0.68	33.32
		0.20		
13	1.10		0.83	33.17
		0.20		
14	1.30		0.98	33.02
		0.30		
15	1.60		1.20	32.80
		0.35		
16	1.95		1.46	32.54
		0.30		
17	2.25		1.69	32.31
		0.30		
18	2.55		1.91	32.09
		0.30		
19	2.85		2.14	31.86
		0.40		
20	3.25		2.44	31.56
		0.30		
21	3.55		2.66	31.34
		0.30		
22	3.85		2.89	31.11
		0.35		
23	4.20		3.15	30.85
		0.35		
24	4.55		3.41	30.59
		0.25		
25	4.80		3.60	30.40
		0.30		
26	5.10		3.83	30.17
		0.25		
27	5.35		4.01	29.99
		0.25		
28	5.60		4.20	29.80
		0.25		
29	5.85		4.39	29.61
		0.25		
30	6.10		4.58	29.42

Reihe der absteigenden Anfangsspannungen.

Beginn 3 h 38 m.
Schluss 3 h 51 m.

Anf.-Sp. 165.85.
Ndl. 8.5.
Max. 37.5; 7.45; red. 5.59.
Wdp. 23.0; 3.05; red. 2.29.
Arb. 927.10.

10	0.40		0.30	33.70
		0.20		
12	0.60		0.45	33.55
		0.20		
14	0.80		0.60	33.40
		0.50		
16	1.30		0.98	33.02
		0.50		
18	1.80		1.35	32.65
		0.50		
20	2.30		1.73	32.27
		0.50		
22	2.80		2.10	31.90
		0.50		
24	3.30		2.48	31.52
		0.50		

		0.50		
26	3.80		2.85	31.15
		0.50		
28	4.30		3.23	30.77
		0.50		
30	4.80		3.60	30.40
		0.50		
32	5.30		3.98	30.02

Anf.-Sp. 133.00.
Ndl. 8.5.
Max. 53.0; 8.00; red. 6.00.
Wdp. 26.0; 3.15; red. 2.36.
Arb. 798.00.

10	0.15		0.11	33.89
		0.10		
12	0.25		0.19	33.81
		0.25		
14	0.50		0.38	33.62
		0 30		
16	0.80		0.60	33.40
		0.40		
18	1.20		0.90	33.10
		0.40		
20	1.60		1.20	32.80
		0.40		
22	2.00		1.50	32.50
		0.60		
24	2.60		1.95	32.05
		0.55		
26	3.15		2.36	31.64
		0.60		
28	3.75		2.81	31.19
		0 55		
30	4.30		3.23	30.77
		0.45		
32	4.75		3.56	30.44
		0.50		
34	5.25		3.94	30.06
		0.50		
36	5.75		4.31	29.69
		0.45		
38	6.20		4.65	20.35
		0.45		
40	6.65		4.99	20.01

Anf.-Sp. 110.60.
Ndl. 8.5.
Max. 56.0; 8.60; red. 6.45.
Wdp. 25.0; 2.90; red. 2.18.
Arb. 613.37.

12	0.20		0.15	33.85
		0.30		
14	0.50		0.38	33.62
		0.30		
16	0.80		0.60	33.40
		0.40		
18	1.20		0.90	33.10
		0.40		
20	1.60		1.20	32.80
		0.45		
22	2.05		1.54	32.46
		0.55		
24	2.60		1.95	32.05
		0.60		
26	3.20		2.40	31.60
		0.55		
28	3.75		2.81	31.19
		0.55		
30	4.30		3.23	30.77
		0.55		
32	4.85		3.64	30.36
		0.55		
34	5.40		4.05	29.95
		0.50		
36	5.90		4.43	29.57
		0.50		
38	6.40		4.80	29.20
		0.40		
40	6.80		5.10	28.90

Anf.-Sp. 88.82.
Ndl. 8.5.
Max. 60.0; 9.85; red. 7.39.
Wdp. 28.0; 4.15; red. 3.11.
Arb. 656.38.

14	0.50		0.38	33.62
		0.40		
16	0.90		0.68	33.32
		0.40		
18	1.30		0.97	33.03
		0.50		

Digitized by Google

20	1.80	0.50	1.35	32.65
22	2.35	0.55	1.76	32.24
24	2.95	0.60	2.21	31.79
26	3.55	0.60	2.66	31.34
28	4.15	0.60	3.11	30.89
30	4.75	0.60	3.56	30.44
32	5.35	0.60	4.01	29.99
34	5.90	0.55	4.43	29.57
36	6.50	0.60	4.88	29.12
38	6.95	0.45	5.21	28.79
40	7.50	0.50	5.63	28.37
42	8.00	0.50	6.00	28.00

Anf.-Sp. 66.42.
Ndl. 8.0.
Max. 72.0; 12.10; red. 9.08.
Wdp. 27.0; 3.75; red. 2.81.
Arb. 603.09.

14	0.30		0.23	33.77
16	0.70	0.40	0.53	33.47
18	1.10	0.40	0.83	33.17
20	1.55	0.45	1.16	32.84
22	2.15	0.60	1.61	32.39
24	2.75	0.60	2.07	31.93
26	3.40	0.65	2.55	31.45
28	4.05	0.65	3.04	30.96
30	4.70	0.65	3.53	30.47
32	5.30	0.60	3.98	30.02
34	5.90	0.60	4.43	29.57
36	6.50	0.60	4.88	29.12
38	7.10	0.60	5.33	28.67
40	7.70	0.60	5.78	28.22
42	8.20	0.50	6.15	27.85

Anf.-Sp. 55.45.
Ndl. 8.0.
Max. 80.5; 13.50; red. 10.13.
Wdp. 30.0; 5.15; red. 3.86.
Arb. 561.71.

14	0.45		0.34	33.66
16	0.85	0.40	0.64	33.36
18	1.30	0.45	0.98	33.02
20	1.75	0.45	1.31	32.69
22	2.35	0.60	1.76	32.24
24	3.05	0.70	2.29	31.71
26	3.75	0.70	2.81	31.19
28	4.45	0.70	3.34	30.66
30	5.15	0.70	3.86	30.14
32	5.85	0.70	4.39	29.61
34	6.50	0.65	4.88	29.12
36	7.20	0.70	5.40	28.60
38	7.85	0.65	5.89	28.11
40	8.45	0.60	6.34	27.66
42	9.10	0.65	6.83	27.17

Anf.-Sp. 44.18.
Ndl. 8.0.
Max. 92.0; 18.00; red. 13.50.
Wdp. 32.0; 5.80; red. 4.35.
Arb. 596.43.

14	0.70		0.53	33.47
16	1.00	0.30	0.75	33.25
18	1.35	0.35	1.01	32.99
20	1.75	0.40	1.31	32.69
22	2.20	0.45	1.65	32.35
24	2.95	0.75	2.21	31.79
26	3.70	0.75	2.78	31.22
28	4.40	0.70	3.30	30.70
30	5.10	0.70	3.83	30.17
32	5.80	0.70	4.35	29.65
34	6.55	0.75	4.91	29.09
36	7.30	0.75	5.48	28.52
38	8.05	0.75	6.04	27.96
40	8.75	0.70	6.56	27.44
42	9.50	0.75	7.13	26.87

Anf.-Sp. 33.37.
Ndl. 8.0.
Max. 109.5; 19.45; red. 14.59.
Wdp. 31.0; 5.05; red. 3.79.
Arb. 486.86.

20	1.55		1.16	32.84
22	2.10	0.55	1.58	32.42
24	2.70	0.60	2.03	31.97
26	3.30	0.60	2.48	31.52
28	3.95	0.65	2.96	31.04
30	4.65	0.70	3.49	30.51
32	5.40	0.75	4.05	29.95
34	6.10	0.70	4.58	29.42
36	6.80	0.70	5.10	28.90
38	7.50	0.70	5.63	28.37
40	8.15	0.65	6.11	27.89
42	8.80	0.65	6.60	27.40
44	9.40	0.60	7.05	26.95
46	10.00	0.60	7.50	26.50

Anf.-Sp. 21.88.
Ndl. 7.5.
Max. 145.0; 25.25; red. 18.94.
Wdp. 37.0; 7.10; red. 5.33.
Arb. 414.41.

20	1.50		1.13	32.87
22	2.00	0.50	1.50	32.50
24	2.60	0.60	1.95	32.05
26	3.25	0.65	2.44	31.56
28	3.95	0.70	2.96	31.04
30	4.60	0.65	3.45	30.55
32	5.30	0.70	3.98	30.02
34	6.00	0.70	4.50	29.50
36	6.70	0.70	5.03	28.97
38	7.45	0.75	5.59	28.41
40	8.15	0.70	6.11	27.89
42	8.80	0.65	6.60	27.40
44	9.45	0.65	7.09	26.91
46	10.10	0.65	7.58	26.42
48	10.70	0.60	8.03	25.97
50	11.30	0.60	8.48	25.52

Versuch LI. 8/XI. 88 Vorm.

Trägheitsmoment Stab (28).
Muskellänge 38 mm.
Muskelmasse 3.063 g.

Reihe der aufsteigenden Anfangsspannungen.

Beginn 11 h 12 m.
Schluss 11 h 37 m.

Anf.-Sp. 21.88.
Ndl. 13.0.
Max. 221.0; 62.40; red. 46.80.
Wdp. 29.0; 8.65; red. 6.49.
Arb. 1023.98.

10	0.30		0.23	37.77
12	0.70	0.40	0.53	37.47
14	1.25	0.55	0.94	37.06
16	1.95	0.70	1.46	36.54
18	2.80	0.85	2.10	35.90
20	3.70	0.90	2.78	35.22
22	4.75	1.05	3.56	34.44
24	5.85	1.10	4.39	33.61
26	6.95	1.10	5.21	32.79
28	8.05	1.10	6.04	31.96
30	9.20	1.15	6.90	31.10
32	10.20	1.00	7.65	30.35
34	11.10	0.90	8.33	29.67
36	12.00	0.90	9.00	29.00
38	12.85	0.85	9.64	28.36
40	13.70	0.85	10.28	27.72
42	14.60	0.90	10.95	27.05

Anf.-Sp. 33.37.
Ndl. 14.5.
Max. 160.5; 43.50; red. 32.63.
Wdp. 29.0; 8.25; red. 6.19.
Arb. 1088.86.

10	0.25		0.19	37.81
12	0.55	0.30	0.41	37.59
14	1.10	0.55	0.83	37.17
16	1.75	0.65	1.31	36.69
18	2.50	0.75	1.88	36.12
20	3.45	0.95	2.59	35.41
22	4.40	0.95	3.30	34.70
24	5.50	1.10	4.13	33.87
26	6.60	1.10	4.95	33.05
28	7.70	1.10	5.78	32.22
		1.05		

Digitized by Google

30	8.75	1.05	6.56	31.44
32	9.80	1.05	7.35	30.65
34	10.90	1.10	8.18	29.82
36	12.00	1.10	9.00	29.00
38	13.00	1.00	9.75	28.25
40	14.00	1.00	10.50	27.50
42	15.00	1.00	11.25	26.75
44	16.00	1.00	12.00	26.00
46	17.00	1.00	12.75	25.25
48	18.00	1.00	13.50	24.50
50	19.00	1.00	14.25	23.75

Anf.-Sp. 44.18.
Ndl. 16.5.
Max. 122.5; 29.55; red. 22.16.
Wdp. 29.0; 7.15; red. 5.36.
Arb. 979.03.

12	0.65	0.45	0.49	37.51
14	1.10	0.55	0.83	37.17
16	1.65	0.65	1.24	36.76
18	2.30	0.75	1.73	36.27
20	3.05	0.80	2.29	35.71
22	3.85	0.95	2.89	35.11
24	4.80	0.95	3.60	34.40
26	5.75	0.95	4.31	33.69
28	6.70	0.95	5.03	32.97
30	7.65	0.95	5.74	32.26
32	8.60	0.95	6.45	31.55
34	9.55	0.95	7.16	30.84
36	10.50	0.90	7.88	30.12
38	11.40		8.55	29.45

Anf.-Sp. 55.45.
Ndl. 16.0.
Max. 102.0; 28.00; red. 21.00.
Wdp. 28.0; 6.00; red. 4.50.
Arb. 1164.45.

12	0.45	0.30	0.34	37.66
14	0.75	0.45	0.56	37.44
16	1.20	0.60	0.90	37.10
18	1.80	0.75	1.35	36.65
20	2.55	0.75	1.91	36.09
22	3.30	0.85	2.48	35.52
24	4.15	0.90	3.11	34.89
26	5.05	0.95	3.79	34.21
28	6.00	0.90	4.50	33.50
30	6.90	0.95	5.18	32.82
32	7.85	0.80	5.89	32.11
34	8.65	0.90	6.49	31.51
36	9.55	0.90	7.16	30.84
38	10.45		7.84	30.16

Anf.-Sp. 66.42.
Ndl. 15.5.
Max. 92.0; 22.80; red. 17.10.
Wdp. 26.0; 6.05; red. 4.54.
Arb. 1135.78.

10	0.40	0.25	0.30	37.70
12	0.65	0.45	0.49	37.51
14	1.10	0.60	0.83	37.17
16	1.70	0.65	1.28	36.72
18	2.35	0.85	1.76	36.24
20	3.20	0.95	2.40	35.60
22	4.15	0.95	3.11	34.89
24	5.10	0.95	3.83	34.17
26	6.05	0.95	4.54	33.46
28	7.00	0.95	5.25	32.75
30	7.95	0.95	5.96	32.11
32	8.90		6.68	31.32

Anf.-Sp. 88.82.
Ndl. 15.0.
Max. 64.0; 17.40; red. 13.05.
Wdp. 27.0; 5.95; red. 4.46.
Arb. 1159.10.

12	0.55	0.30	0.41	37.59
14	0.85	0.55	0.64	37.36
16	1.40	0.75	1.05	36.95
18	2.15	0.75	1.61	36.39
20	2.90	0.80	2.18	35.82
22	3.70	0.90	2.78	35.22
24	4.60	0.90	3.45	34.25
26	5.50	0.90	4.13	33.87
28	6.40	0.90	4.80	33.20
30	7.30	0.90	5.48	32.52
32	8.20		6.15	31.85

Anf.-Sp. 110.60.
Ndl. 14.5.
Max. 64.5; 14.60; red. 10.95.
Wdp. 25.0; 4.95; red. 3.71.
Arb. 1211.07.

10	0.15	0.30	0.11	37.89
12	0.45	0.40	0.34	37.66
14	0.85	0.60	0.64	37.36
16	1.45	0.70	1.09	36.91
18	2.15	0.70	1.61	36.39
20	2.85	0.80	2.14	35.86
22	3.65	0.85	2.74	35.26
24	4.50	0.85	3.38	34.62
26	5.35	0.85	4.01	33.99
28	6.20	0.80	4.65	33.35
30	7.00		5.25	32.75

Anf.-Sp. 133.00.
Ndl. 13.5.
Max. 49.5; 12.20; red. 9.15.
Wdp. 23.0; 5.05; red. 3.79.
Arb. 1216.95.

10	0.35	0.35	0.26	37.74
12	0.70	0.60	0.53	37.47
14	1.30	0.70	0.98	37.02
16	2.00	0.80	1.50	36.50
18	2.80	0.90	2.10	35.90

20	3.70	0.90	2.78	35.22
22	4.60	0.90	3.45	34.55
24	5.50	0.90	4.13	33.87
26	6.40	0.90	4.80	33.20
28	7.30	0.90	5.48	32.52

Anf.-Sp. 165.85.
Ndl. 13.5.
Max. 43.5; 10.90; red. 8.18.
Wdp. 20.0; 4.70; red. 3.53.
Arb. 1356.65.

8	0.50	0.25	0.38	37.62
9	0.75	0.25	0.56	37.44
10	1.00	0.25	0.75	37.25
11	1.25	0.30	0.94	37.06
12	1.55	0.30	1.16	36.84
13	1.85	0.35	1.39	36.61
14	2.20	0.40	1.65	36.35
15	2.60	0.40	1.95	36.05
16	3.00	0.40	2.25	35.75
17	3.40	0.40	2.55	35.45
18	3.80	0.50	2.85	35.15
19	4.30	0.40	3.23	34.77
20	4.70	0.45	3.53	34.47
21	5.15	0.50	3.86	34.14
22	5.65	0.45	4.24	33.76
23	6.10	0.40	4.58	33.42
24	6.50	0.35	4.88	33.12
25	6.85	0.35	5.14	32.86
26	7.20	0.40	5.40	32.60
27	7.60		5.70	32.30

Reihe der absteigenden Anfangsspannungen.

Beginn 11 h 48 m.
Schluss 12 h 15 m.

Anf.-Sp. 165.85.
Ndl. 13.0.
Max. 51.5; 9.80; red. 7.35.
Wdp. 25.0; 3.85; red. 2.89.
Arb. 1219.00.

10	0.20	0.20	0.15	37.85
12	0.40	0.30	0.30	37.70
14	0.70	0.40	0.53	37.47
16	1.10	0.45	0.83	37.17
18	1.55	0.65	1.16	36.84
20	2.20	0.65	1.65	36.35
22	2.85	0.65	2.14	35.86
24	3.50	0.70	2.63	35.37
26	4.20	0.65	3.15	34.85
28	4.85	0.65	3.64	34.36
30	5.50	0.70	4.13	33.87
32	6.20		4.65	33.35

Anf.-Sp. 133.00.
Ndl. 12.0.

Digitized by Google

Max. 60.0; 11.25; red. 8.40.
Wdp. 26.0; 4.40; red. 3.30.
Arb. 1117.20.

12	0.60	0.35	0.45	37.55
14	0.95	0.35	0.71	37.29
16	1.30	0.50	0.98	37.02
18	1.80	0.65	1.35	36.65
20	2.45	0.55	1.84	36.16
22	3.00	0.70	2.25	35.75
24	3.70	0.70	2.78	35.22
26	4.40	0.65	3.30	34.70
28	5.05	0.65	3.78	34.21
30	5.70	0.65	4.28	33.72
32	6.35	0.65	4.76	33.24
34	7.00		5.25	32.75

Anf.-Sp. 110.60.

Ndl. 11.5.
Max. 65.5; 12.55; red. 9.41.
Wdp. 27.0; 5.00; red. 3.75.
Arb. 1040.75.

10	0.25	0.35	0.19	37.81
12	0.60	0.35	0.45	37.55
14	0.95	0.40	0.71	37.29
16	1.35	0.50	1.01	36.99
18	1.85	0.65	1.39	36.61
20	2.50	0.70	1.88	36.12
22	3.20	0.70	2.40	35.60
24	3.90	0.70	2.93	35.07
26	4.60	0.75	3.45	34.55
28	5.35	0.65	4.01	33.99
30	6.00	0.65	4.50	33.50
32	6.65	0.65	4.99	33.01
34	7.30	0.65	5.48	32.52
36	7.95		5.96	32.04

Anf.-Sp. 88.82.

Ndl. 11.0.
Max. 80.5; 14.50; red. 10.88.
Wdp. 28.0; 4.40; red. 3.30.
Arb. 966.36.

14	0.50	0.40	0.38	37.62
16	0.90	0.40	0.68	37.32
18	1.30	0.50	0.98	37.02
20	1.80	0.55	1.35	36.65
22	2.35	0.65	1.76	36.24
24	3.00	0.70	2.25	35.75
26	3.70	0.70	2.78	35.22
28	4.40	0.70	3.30	34.70
30	5.10	0.70	3.83	34.17
32	5.80	0.65	4.35	33.65
34	6.45	0.65	4.84	33.16
36	7.10	0.65	5.33	32.67
38	7.75	0.65	5.81	32.19
40	8.40		6.30	31.70

Anf.-Sp. 66.42.

Ndl. 10.5.
Max. 99.5; 21.20; red. 15.90(!).
Wdp. 30.0; 5.55; red. 4.16.
Arb. 1056.78.

14	0.30	0.40	0.23	37.77
16	0.70	0.50	0.53	37.47
18	1.20	0.50	0.90	37.10
20	1.70	0.65	1.28	36.72
22	2.35	0.75	1.76	36.24
24	3.10	0.80	2.33	35.67
26	3.90	0.80	2.93	35.07
28	4.70	0.85	3.53	34.47
30	5.55	0.85	4.16	33.84
32	6.40	0.80	4.80	33.20
34	7.20	0.80	5.40	32.60
36	8.00		6.00	32.00

Anf.-Sp. 55.45.

Ndl. 10.0.
Max. 85.5; 15.20; red. 11.40.
Wdp. 29.0; 5.05; red. 3.79.
Arb. 632.13.

14	0.50	0.40	0.38	37.62
16	0.90	0.50	0.68	37.32
18	1.40	0.60	1.05	36.95
20	2.00	0.60	1.50	36.50
22	2.60	0.70	1.95	36.05
24	3.30	0.70	2.48	35.52
26	4.00	0.70	3.00	35.00
28	4.70	0.70	3.53	34.47
30	5.40	0.70	4.05	33.95
32	6.10	0.70	4.58	33.42
34	6.80	0.70	5.10	32.90
36	7.50		5.63	32.37

Anf.-Sp. 44.18.

Ndl. 9.5.
Max. 98.0; 18.65; red. 13.99.
Wdp. 30.0; 6.00; red. 4.50.
Arb. 618.08.

14	0.85	0.50	0.64	37.36
16	1.35	0.50	1.01	36.99
18	1.85	0.60	1.39	36.61
20	2.45	0.70	1.84	36.16
22	3.15	0.70	2.36	35.64
24	3.85	0.70	2.89	35.11
26	4.55	0.75	3.41	34.59
28	5.30	0.70	3.98	34.02
30	6.00	0.70	4.50	33.50
32	6.70	0.70	5.03	32.97
34	7.40	0.70	5.55	32.45
36	8.10	0.70	6.08	31.92
38	8.80	0.70	6.60	31.40
40	9.50		7.13	30.87

Anf.-Sp. 33.37.

Ndl. 9.0.
Max. 121.5; 23.15; red. 17.36.
Wdp. 34.0; 7.00; red. 5.25.
Arb. 579.30.

16	1.20	0.45	0.90	37.10
18	1.65	0.50	1.24	36.76
20	2.15	0.65	1.61	36.39
22	2.80	0.70	2.10	35.90
24	3.50	0.70	2.63	35.37
26	4.20	0.65	3.15	34.85
28	4.85	0.70	3.64	34.36
30	5.55	0.75	4.16	33.84
32	6.30	0.70	4.73	33.27
34	7.00	0.75	5.25	32.75
36	7.57	0.75	5.81	32.19
38	8.50	0.70	6.38	31.62
40	9.20	0.65	6.90	31.10
42	9.85	0.65	7.39	30.61
44	10.50	0.70	7.88	30.12
46	11.20	0.65	8.40	29.60
48	11.85	0.65	8.89	29.11
50	12.50		9.38	28.62

Anf.-Sp. 21.88.

Ndl. 8.5.
Max. 160.5; 29.05; red. 21.79.
Wdp. 36.0; 7.35; red. 5.51.
Arb. 476.81.

20	2.00	0.60	1.50	36.50
22	2.60	0.65	1.95	36.05
24	3.25	0.75	2.44	35.56
26	4.00	0.60	3.00	35.00
28	4.60	0.80	3.45	34.55
30	5.40	0.65	4.05	33.95
32	6.05	0.75	4.54	33.46
34	6.80	0.75	5.10	32.90
36	7.55	0.75	5.66	32.34
38	8.30	0.75	6.23	31.77
40	9.05	0.70	6.79	31.21
42	9.75	0.65	7.31	30.69
44	10.40	0.65	7.80	30.20
46	11.05	0.65	8.29	29.71
48	11.70	0.70	8.78	29.22
50	12.40	0.60	9.30	28.70
52	13.00	0.60	9.75	28.25
54	13.60	0.60	10.20	27.80
56	14.20	0.60	10.65	27.35
58	14.80	0.60	11.10	26.90
60	15.40	0.60	11.55	26.45
62	16.00		12.00	26.00

Digitized by Google

Versuch LIII. 10/XI. 88.

Maximalmoment.

Muskellänge 34 mm.
Muskelmasse 2.524 g.

Muskel blass.

Reihe der aufsteigenden Anfangsspannungen.

Anf.-Sp. 21.88.
Ndl. 8.0.
Hub 1.40; red. 1.05.
Arb. 22.97.

Anf.-Sp. 21.88 wdh.
Ndl. 8.0.
Hub 1.35; red. 1.01.
Arb. 22.10.

Anf.-Sp. 33.37.
Ndl. 9.5.
Hub 0.90; red. 0.68.
Arb. 22.69.

Anf.-Sp. 33.37 wdh.
Ndl. 10.0.
Hub 0.90; red. 0.68.
Arb. 22.69.

Anf.-Sp. 44.18.
Ndl. 9.0.
Hub 0.55; red. 0.41.
Arb. 18.11.

Anf.-Sp. 44.18 wdh.
Ndl. 9.5.
Hub 0.55; red. 0.41.
Arb. 18.11.

Anf.Sp. 55.45.
Ndl. 9.0.
Hub 0.45; red. 0.34.
Arb. 18.85.

Anf.-Sp. 55.45 wdh.
Ndl. 9.0.
Hub 0.45; red. 0.34.
Arb. 18.85.

Anf.-Sp. 66.42.
Ndl. 8.0.
Hub 0.35; red. 0.26.
Arb. 17.27.

Anf.-Sp. 66.42 wdh.
Ndl. 8.0.
Hub 0.35; red. 0.26.
Arb. 17.27.

Anf.-Sp. 88.82.
Ndl. 7.0.
Hub 0.20; red. 0.15.
Arb. 13.32.

Anf.-Sp. 88.82 wdh.
Ndl. 7.0.
Hub 0.20; red. 0.15.
Arb. 13.32.

Anf.-Sp. 110.60.
Ndl. 6.0.
Hub 0.10; red. 0.08.
Arb. 8.85.

Anf.-Sp. 110.60 wdh.
Ndl. 5.5.
Hub 0.10; red. 0.08.
Arb. 8.85.

Anf.-Sp. 133.00.
Ndl. 5.0.
Hub 0.00.
Arb. 0.00.

Anf.-Sp. 133.00 wdh.
Ndl. 4.5.
Hub 0.00.
Arb. 0.00

Anf.-Sp. 165.85.
Ndl. 4.0.
Hub 0.00.
Arb. 0.00.

Anf.-Sp. 165.85 wdh.
Ndl. 4.0.
Hub 0.00.
Arb. 0.00.

Versuch LXIII. 20/XI. 88.

Muskellänge 37 mm.
Muskelmasse 3.463 g.

Trägheitsmoment Stab (18).

Reihe der aufsteigenden Anfangsspannungen.

Beginn 11 h 12 m.
Schluss 11 h 33 m.

Anf.-Sp. 10.97.
Ndl. 12.5.
Max. 144.0; 54.00; red. 40.50.
Wdp. 20.5; 8.95; red. 6.71.
Arb. 444.29.

10	1.70	0.55	1.28	35.72
11	2.25	0.60	1.69	35.31
12	2.85	0.65	2.14	34.86
13	3.50	0.70	2.63	34.37
14	4.20	0.70	3.15	33.85
15	4.90	0.70	3.68	33.32
16	5.60	0.75	4.20	32.80
17	6.35	0.75	4.76	32.24
18	7.10	0.75	5.33	31.67
19	7.85	0.70	5.89	31.11
20	8.55	0.80	6.41	30.59
21	9.35	0.75	7.01	29.99
22	10.10	0.75	7.58	29.42
23	10.85	0.70	8.14	28.86
24	11.55	0.75	8.66	28.34
25	12.30	0.70	9.23	27.77
26	13.00	0.70	9.75	27.25
27	13.70	0.70	10.28	26.72
28	14.40		10.80	26.20

Anf.-Sp. 21.88.
Ndl. 13.5.
Max. 92.0; 33.80; red. 25.35.
Wdp. 21.0; 8.55; red. 6.41.
Arb. 554.66.

10	1.30	1.05	0.98	36.02
12	2.35	1.25	1.76	35.24
14	3.60	1.40	2.70	34.30
16	5.00	1.40	3.75	33.25
18	6.40	1.40	4.80	32.20
20	7.80	1.50	5.85	31.15
22	9.30	1.40	6.98	30.02
24	10.70	1.40	8.03	28.97
26	12.10	1.30	9.08	27.92
28	13.40	1.25	10.05	26.95
30	14.65	1.25	10.99	26.01
32	15.90	1.20	11.93	25.07
34	17.10	1.15	12.83	24.17
36	18.35	1.05	13.76	23.24
38	19.40	1.05	14.55	22.45
40	20.45	1.05	15.34	21.66
42	21.50		16.13	20.87

Anf.-Sp. 33.37.
Ndl. 14.5.
Max. 68.0; 24.60; red. 18.45.
Wdp. 20.0; 7.75; red. 5.81.
Arb. 615.68.

10	1.45	0.40	1.09	35.91
11	1.85	0.55	1.39	35.61
12	2.40	0.60	1.80	35.20
13	3.00	0.60	2.25	34.75
14	3.60	0.70	2.70	34.30
15	4.30	0.70	3.23	33.77
16	5.00	0.70	3.75	33.25
17	5.70	0.70	4.28	32.72
18	6.40	0.65	4.80	32.20

Digitized by Google

		0.65		
19	7.05		5.29	31.71
		0.70		
20	7.75		5.81	31.19
		0.65		
21	8.40		6.30	30.70
		0.70		
22	9.10		6.83	30.17
		0.65		
23	9.75		7.31	29.69
		0.70		
24	10.45		7.84	29.16
		0.65		
25	11.10		8.33	28.67
		0.65		
26	11.75		8.81	28.19
		0.55		
27	12.30		9.23	27.77
		0.60		
28	12.90		9.68	27.32
		0.55		
29	13.45		10.09	26.91
		0.60		
30	14.05		10.54	26.46

Anf.-Sp. 44.18.
Ndl. 15.5.
Max. 56.5; 19.95; red. 14.96.
Wdp. 18.5; 6.70; red. 5.03.
Arb. 660.93.

10	1.40		1.05	35.95
		0.55		
11	1.95		1.46	35.54
		0.55		
12	2.50		1.88	35.12
		0.55		
13	3.05		2.29	34.71
		0.65		
14	3.70		2.78	34.22
		0.70		
15	4.40		3.30	33.70
		0.65		
16	5.05		3.79	33.21
		0.60		
17	5.65		4.24	32.76
		0.70		
18	6.35		4.76	32.24
		0.70		
19	7.05		5.29	31.71
		0.65		
20	7.70		5.78	31.22
		0.65		
21	8.35		6.26	30.74
		0.65		
22	9.00		6.75	30.25
		0.65		
23	9.65		7.24	29.76
		0.65		
24	10.20		7.65	29.35

Anf.-Sp. 55.45.
Ndl. 16.5.
Max. 48.5; 17.25; red. 12.94.
Wdp. 17.0; 6.05; red. 4.54.
Arb. 717.52.

10	1.75		1.31	35.69
		1.10		
12	2.85		2.14	34.86
		1.25		
14	4.10		3.08	33.92
		1.30		
16	5.40		4.05	32.95
		1.30		
18	6.70		5.03	31.97
		1.30		
20	8.00		6.00	31.00

Anf.-Sp. 66.42.
Ndl. 15.5.
Max. 45.0; 15.05; red. 11.29.
Wdp. 16.0; 4.85; red. 3.64.
Arb. 749.88.

8	0.60		0.45	36.55
		0.45		
9	1.05		0.79	36.21
		0.45		
10	1.50		1.13	35.87
		0.40		
11	1.90		1.43	35.57
		0.60		
12	2.50		1.88	35.12
		0.60		
13	3.10		2.33	34.67
		0.60		
14	3.70		2.78	34.22
		0.55		
15	4.25		3.19	33.81
		0.60		
16	4.85		3.64	33.32
		0.55		
17	5.40		4.05	32.95
		0.65		
18	6.05		4.54	32.46
		0.60		
19	6.65		4.99	32.01
		0.65		
20	7.30		5.48	31.52
		0.55		
21	7.85		5.89	31.11

Anf.-Sp. 88.82.
Ndl. 15.0.
Max. 38.5; 12.45; red. 9.34.
Wdp. 16.0; 4.45; red. 3.34.
Arb. 829.58.

8	0.40		0.30	36.70
		0.35		
9	0.75		0.56	36.44
		0.40		
10	1.15		0.86	36.14
		0.50		
11	1.65		1.24	35.76
		0.50		
12	2.15		1.61	35.39
		0.55		
13	2.70		2.03	34.97
		0.55		
14	3.25		2.44	34.56
		0.55		
15	3.80		2.85	34.15
		0.65		
16	4.45		3.34	33.66
		0.60		
17	5.05		3.79	33.21
		0.60		
18	5.65		4.24	32.76
		0.60		
19	6.25		4.69	32.31
		0.55		
20	6.80		5.10	31.90
		0.55		
21	7.35		5.51	31.49
		0.55		
22	7.90		5.93	31.07
		0.50		
23	8.40		6.30	30.70

Anf.-Sp. 110.60.
Ndl. 15.0.
Max. 35.0; 11.10; red. 8.33.
Wdp. 15.5; 4.30; red. 3.23.
Arb. 921.30.

8	0.60		0.45	36.55
		0.45		
9	1.05		0.79	36.21
		0.45		
10	1.50		1.13	35.87
		0.40		
11	1.90		1.43	35.57
		0.55		
12	2.45		1.84	35.16
		0.55		
13	3.00		2.25	34.75
		0.50		
14	3.50		2.63	34.37
		0.55		
15	4.05		3.04	33.96
		0.50		
16	4.55		3.41	33.59
		0.55		
17	5.10		3.83	33.17
		0.55		
18	5.65		4.24	32.76
		0.60		
19	6.25		4.69	32.31
		0.50		
20	6.75		5.06	31.94
		0.50		
21	7.25		5.44	31.56

Anf.-Sp. 133.00.
Ndl. 14.5.
Max. 34.0; 9.95; red. 7.46.
Wdp. 15.0; 3.80; red. 2.85.
Arb. 992.18.

10	1.40		1.05	35.95
		0.95		
12	2.35		1.76	35.24
		0.95		
14	3.30		2.48	34.52
		1.00		
16	4.30		3.23	33.77
		0.95		
18	5.25		3.94	33.06
		0.95		
20	6.20		4.65	32.35

Anf.-Sp. 165.85.
Ndl. 13.5.
Max. 27.5; 8.30; red. 6.23.
Arb. 1033.25.

Reihe der absteigenden Anfangsspannungen.

Beginn 11 h 42 m.
Schluss 12 h 3 m.

Anf.-Sp. 165.85.
Ndl. 14.0.
Max. 31.0; 8.55; red. 6.41.
Arb. 1063.10.

Anf.-Sp. 133.00.
Ndl. 14.0.
Max. 32.0; 9.40; red. 7.05.
Wdp. 15.0; 4.00; red. 3.00.
Arb. 937.65.

8	0.90		0.68	36.32
		0.35		
9	1.25		0.94	36.06
		0.40		
10	1.65		1.24	35.76
		0.35		
11	2.00		1.50	35.50
		0.50		
12	2.50		1.88	35.12
		0.50		
13	3.00		2.25	34.75
		0.50		
14	3.50		2.63	34.37
		0.50		
15	4.00		3.00	34.00
		0.50		
16	4.50		3.38	33.62
		0.50		
17	5.00		3.75	33.25
		0.50		
18	5.50		4.13	32.87
		0.50		
19	6.00		4.50	32.50

Anf.-Sp. 110.60.
Ndl. 14.0.
Max. 35.5; 10.40; red. 7.80.
Wdp. 16.5; 4.35; red. 3.26.
Arb. 862.68.

8	0.40		0.30	36.70
		0.30		
9	0.70		0.53	36.47
		0.45		
10	1.15		0.86	36.14
		0.45		
11	1.60		1.20	35.80
		0.45		
12	2.05		1.54	35.46
		0.50		
13	2.55		1.91	35.09
		0.55		
14	3.10		2.33	34.67
		0.50		
15	3.60		2.70	34.30
		0.50		
16	4.10		3.08	33.92
		0.50		
17	4.60		3.45	33.55
		0.50		
18	5.10		3.83	33.17
		0.50		

Digitized by Google

19	5.60	0.50	4.20	32.80
20	6.10	0.50	4.58	32.42
21	6.60	0.50	4.95	32.05
22	7.10	0.50	5.33	31.67

Anf.-Sp. 88.82.
Ndl. 13.5.
Max. 37.0; 11.95; red. 8.96.
Wdp. 16.0; 4.50; red. 3.38.
Arb. 795.83.

8	0.65	0.35	0.49	36.51
9	1.00	0.40	0.75	36.25
10	1.40	0.45	1.05	35.95
11	1.85	0.45	1.39	35.61
12	2.30	0.50	1.73	35.27
13	2.80	0.55	2.10	34.90
14	3.35	0.55	2.51	34.49
15	3.90	0.60	2.93	34.07
16	4.50	0.55	3.38	33.62
17	5.05	0.55	3.79	33.21
18	5.60	0.50	4.20	32.80
19	6.10		4.58	32.42

Anf.-Sp. 66.42.
Ndl. 12.5.
Max. 43.5; 13.40; red. 10.05.
Wdp. 17.0; 5.45; red. 4.09.
Arb. 667.52.

10	1.55	0.50	1.16	35.84
11	2.05	0.50	1.54	35.46
12	2.55	0.55	1.91	35.09
13	3.10	0.60	2.33	34.67
14	3.70	0.55	2.78	34.22
15	4.25	0.55	3.19	33.81
16	4.80	0.65	3.60	33.40
17	5.45	0.65	4.09	32.91
18	6.10	0.55	4.58	32.42
19	6.65	0.60	4.99	32.01
20	7.25	0.60	5.44	31.56
21	7.85	0.50	5.89	31.11
22	8.35		6.26	30.74

Anf.-Sp. 55.45.
Ndl. 12.5.
Max. 49.5; 16.05; red. 12.04.
Wdp. 17.0; 5.30; red. 3.98.
Arb. 667.62.

10	1.35	0.45	1.01	35.99
11	1.80	0.55	1.35	35.65
12	2.35	0.60	1.76	35.24
13	2.95	0.55	2.21	34.79
14	3.50	0.60	2.63	34.37
15	4.10	0.60	3.08	33.92
16	4.70	0.60	3.53	33.47
17	5.30	0.55	3.98	33.02
18	5.85	0.60	4.39	32.61

19	6.45	0.60	4.84	33.16
20	7.05	0.60	5.29	31.71
21	7.60	0.55	5.70	31.30
22	8.20	0.60	6.15	30.85
23	8.75	0.55	6.56	30.44

Anf.-Sp. 44.18.
Ndl. 12.0.
Max. 56.0; 18.95; red. 14.21.
Wdp. 19.0; 6.80; red. 5.10.
Arb. 627.80.

10	1.50	0.50	1.13	35.87
11	2.00	0.50	1.50	35.50
12	2.50	0.60	1.88	35.12
13	3.10	0.60	2.33	34.67
14	3.70	0.60	2.78	34.22
15	4.30	0.65	3.23	33.77
16	4.95	0.65	3.71	33.29
17	5.60	0.60	4.20	32.80
18	6.20	0.60	4.65	32.35
19	6.80	0.60	5.10	31.90
20	7.40	0.65	5.55	31.45
21	8.05	0.60	6.04	30.96
22	8.65	0.55	6.49	30.51
23	9.20	0.60	6.90	30.10
24	9.80	0.60	7.35	29.65
25	10.40	0.60	7.80	29.20
26	11.00		8.25	28.75

Anf.-Sp. 33.37.
Ndl. 12.0.
Max. 65.0; 21.60; red. 16.20.
Wdp. 20.0; 6.85; red. 5.14.
Arb. 540.59.

10	1.20	0.45	0.90	36.10
11	1.65	0.45	1.24	35.76
12	2.10	0.55	1.58	35.42
13	2.65	0.55	1.99	35.01
14	3.20	0.60	2.40	34.60
15	3.80	0.60	2.85	34.15
16	4.40	0.60	3.30	33.70
17	5.00	0.60	3.75	33.25
18	5.60	0.65	4.20	32.80
19	6.25	0.60	4.69	32.31
20	6.85	0.65	5.14	31.86
21	7.50	0.65	5.63	31.37
22	8.15	0.65	6.11	30.89
23	8.80	0.55	6.60	30.40
24	9.35	0.55	7.01	29.99
25	9.90	0.60	7.43	29.57
26	10.50		7.88	29.12

Anf.-Sp. 21.88.
Ndl. 11.5.
Max. 87.5; 30.60; red. 22.95.
Wdp. 19.5; 7.80; red. 5.85.
Arb. 502.15.

10	1.50	0.60	1.13	35.87
11	2.10	0.60	1.58	35.42
12	2.70	0.60	2.03	34.97
13	3.30	0.65	2.48	34.52
14	3.95	0.65	2.96	34.04
15	4.60	0.70	3.45	33.55
16	5.30	0.70	3.98	33.02
17	6.00	0.70	4.50	32.60
18	6.70	0.70	5.03	31.97
19	7.40	0.75	5.55	31.45
20	8.15	0.70	6.11	30.89
21	8.85	0.70	6.64	30.36
22	9.55	0.70	7.16	29.84
23	10.25	0.70	7.69	29.31
24	10.95	0.60	8.21	28.79
25	11.55	0.65	8.66	28.34
26	12.20	0.60	9.15	27.85
27	12.80	0.60	9.60	27.40
28	13.40	0.60	10.05	26.95
29	14.00	0.60	10.50	26.50
30	14.60		10.95	26.05

Anf.-Sp. 10.97.
Ndl. 11.0.
Max. 139.0; 50.25; red. 37.69.
Wdp. 21.0; 8.95; red. 6.71.
Arb. 413.46.

10	1.60	0.50	1.20	35.80
11	2.10	0.60	1.58	35.42
12	2.70	0.65	2.03	34.97
13	3.35	0.65	2.51	34.49
14	4.00	0.65	3.00	34.00
15	4.65	0.70	3.49	33.51
16	5.35	0.70	4.01	32.99
17	6.05	0.75	4.54	32.46
18	6.80	0.70	5.10	31.90
19	7.50	0.75	5.63	31.37
20	8.25	0.70	6.19	30.81
21	8.95	0.70	6.71	30.29
22	9.65	0.70	7.24	29.76
23	10.35	0.65	7.76	29.24
24	11.00	0.70	8.25	28.75
25	11.70	0.70	8.78	28.22
26	12.40	0.70	9.30	27.70
27	13.10	0.65	9.83	27.17
28	13.75	0.65	10.31	26.69
29	14.40	0.65	10.80	26.20
30	15.05		11.29	25.71

Anf.-Sp. 10.97 wdh.
Ndl. 11.0.
Max. 139.0; 46.30; red. 34.73.
Wdp. 23.0; 8.55; red. 6.41.
Arb. 380.99.

10	0.80	0.40	0.60	36.40
11	1.20	0.40	0.90	36.10
12	1.60	0.50	1.20	35.80

Digitized by Google

13	2.10	0.50	1.58	35.42
14	2.60	0.50	1.95	35.05
15	3.20	0.60	2.40	34.60
16	3.80	0.60	2.85	34.15
17	4.45	0.65	3.34	33.66
18	5.15	0.70	3.86	33.14
19	5.85	0.70	4.39	32.61
20	6.55	0.70	4.91	32.09
21	7.20	0.65	5.40	31.60
22	7.95	0.75	5.96	31.04
23	8.55	0.60	6.41	30.59
24	9.25	0.70	6.94	30.06
25	9.95	0.70	7.46	29.54
26	10.60	0.65	7.95	29.05
27	11.25	0.65	8.44	28.56
28	11.85	0.60	8.89	28.11
29	12.50	0.65	9.38	27.62
30	13.20	0.70	9.90	27.10

Maximalmoment.

Beginn 12 h 22 m.
Schluss 12 h 40 m.

Anf.-Sp. 165.85.
Ndl. 15.0.
Hub 1.05; red. 0.79.
Arb. 131.02.

Anf.-Sp. 133.00.
Ndl. 13.5.
Hub 1.30; red. 0.98.
Arb. 130.34.

Anf.-Sp. 110.60.
Ndl. 13.0.
Hub 1.50; red. 1.13.
Arb. 124.98.

Anf.-Sp. 88.82.
Ndl. 13.0.
Hub 1.70; red. 1.28.
Arb. 113.69.

Anf.-Sp. 66.42.
Ndl. 12.5.
Hub 1.90; red. 1.43.
Arb. 94.98.

Anf.-Sp. 55.45.
Ndl. 12.5.
Hub 2.20; red. 1.65.
Arb. 91.49.

Anf.-Sp. 44.18.
Ndl. 12.5.
Hub 2.80; red. 2.10.
Arb. 92.78.

Anf.-Sp. 33.37.
Ndl. 12.0.
Hub 2.70; red. 2.03.
Arb. 67.74.

Anf.-Sp. 21.88.
Ndl. 11.0.
Hub 2.00; red. 1.50.
Arb. 32.82.

Anf.-Sp. 10.97.
Ndl. 10.0.
Hub 2.20; red. 1.65.
Arb. 18.10.

Constante Anfangsspannung 66.42 g.

Beginn 3 h 50 m.
Schluss 4 h 26 m.

Minimalmoment.

Ndl. 7.0.
Max. 30.5; 6.30; red. 4.73.

Stab (18).

Ndl. 7.5.
Max. 41.0; 8.20; red. 6.15.
Wdp. 20.0; 3.40; red. 2.55.

10	0.25		0.19	36.81
11	0.45	0.20	0.34	36.66
12	0.65	0.20	0.49	36.51
13	0.90	0.25	0.68	36.32
14	1.20	0.30	0.90	36.10
15	1.55	0.35	1.16	35.84
16	1.90	0.35	1.43	35.57
17	2.25	0.35	1.69	35.31
18	2.60	0.35	1.95	35.05
19	3.00	0.40	2.25	34.75
20	3.40	0.40	2.55	34.45
21	3.75	0.35	2.81	34.19
22	4.15	0.40	3.11	33.89
23	4.50	0.35	3.38	33.62
24	4.85	0.35	3.64	33.36
25	5.20	0.35	3.90	33.10
26	5.55	0.35	4.16	32.84
27	5.85	0.30	4.39	32.61

Stab (24).

Ndl. 7.5.
Max. 60.0; 10.60; red. 7.95.
Wdp. 25.5; 4.00; red. 3.00.

12	0.40		0.30	36.70
14	0.70	0.30	0.53	36.47
16	1.10	0.40	0.83	36.17
18	1.55	0.45	1.16	35.84
20	2.15	0.60	1.61	35.39
		0.65		
22	2.80	0.65	2.10	34.90
24	3.50	0.70	2.63	34.37
26	4.15	0.65	3.11	33.89
28	4.80	0.65	3.60	33.40
30	5.45	0.65	4.09	32.91
32	6.10	0.65	4.58	32.42
34	6.65	0.55	4.99	32.01
36	7.20	0.55	5.40	31.60
38	7.80	0.60	5.85	31.15

Stab (28).

Ndl. 7.5.
Max. 73.0; 12.20; red. 9.15.
Wdp. 29.0; 4.40; red. 3.30.

14	0.45		0.34	36.66
16	0.75	0.30	0.56	36.44
18	1.15	0.40	0.86	36.14
20	1.65	0.50	1.24	35.76
22	2.20	0.55	1.65	35.35
24	2.80	0.60	2.10	34.90
26	3.45	0.65	2.59	34.41
28	4.05	0.60	3.04	33.96
30	4.70	0.65	3.53	33.47
32	5.35	0.65	4.01	32.99
34	6.00	0.65	4.50	32.50
36	6.60	0.60	4.95	32.05
38	7.20	0.60	5.40	31.60
40	7.75	0.55	5.81	31.19
42	8.30	0.55	6.23	30.77

Stab (32).

Ndl. 7.5.
Max. 90.0; 13.50; red. 10.13.
Wdp. 33.0; 5.20; red. 3.90.

18	1.05		0.79	36.21
20	1.55	0.50	1.16	35.84
22	2.05	0.50	1.54	35.46
24	2.60	0.55	1.95	35.05
26	3.15	0.55	2.36	34.64
28	3.70	0.55	2.78	34.22
30	4.25	0.55	3.19	33.81
32	4.85	0.60	3.64	33.36
34	5.50	0.65	4.13	32.87
36	6.10	0.60	4.58	32.42
38	6.65	0.55	4.99	32.01
40	7.20	0.55	5.40	31.60
42	7.70	0.50	5.78	31.22
44	8.20	0.50	6.15	30.85

Stab (36).

Ndl. 7.0.
Max. 104.0; 13.35; red. 10.01.
Wdp. 34.0; 4.30; red. 3.23.

16	0.50		0.38	36.62
18	0.80	0.30	0.60	36.40
20	1.15	0.35	0.86	36.14
		0.35		

Digitized by Google

22	1.50	0.35	1.13	35.87
24	1.90	0.40	1.43	35.57
26	2.35	0.45	1.76	35.24
28	2.80	0.45	2.10	34.90
30	3.30	0.50	2.48	34.52
32	3.80	0.50	2.85	34.15
34	4.30	0.50	3.23	33.77
36	4.80	0.50	3.60	33.40
38	5.30	0.50	3.98	33.02
40	5.80	0.50	4.35	32.65
42	6.25	0.45	4.69	32.31

Stab (40).

Ndl. 7.0.
Max. 122.0; 14.45; red. 10.84.
Wdp. 38.0; 4.60; red. 3.45.

16	0.40		0.30	36.70
18	0.65	0.25	0.49	36.51
20	0.95	0.30	0.71	36.29
22	1.25	0.30	0.94	36.06
24	1.55	0.30	1.16	35.84
26	1.95	0.40	1.46	35.54
28	2.35	0.40	1.76	35.24
30	2.80	0.45	2.10	34.90
32	3.25	0.45	2.44	34.56
34	3.70	0.45	2.78	34.22
36	4.15	0.45	3.11	33.89
38	4.60	0.45	3.45	33.55
40	5.05	0.45	3.79	33.21
42	5.50	0.45	4.13	32.87
44	5.95	0.45	4.46	32.54
46	6.40	0.45	4.80	32.20
48	6.85	0.45	5.14	31.86
50	7.25	0.40	5.44	31.56

Stab (48).

Ndl. 7.0.
Max. 181.0; 18.75; red. 14.06.
Wdp. 47.0; 5.00; red. 3.75.

20	0.60		0.45	36.55
22	0.80	0.20	0.60	36.40
24	1.00	0.20	0.75	36.25
26	1.25	0.25	0.94	36.06
		0.25		

28	1.50	0.25	1.13	35.87
30	1.75	0.25	1.31	35.69
32	2.10	0.35	1.58	35.42
34	2.50	0.40	1.88	35.12
36	2.85	0.35	2.14	34.86
38	3.20	0.35	2.40	34.60
40	3.60	0.40	2.70	34.30
42	4.00	0.40	3.00	34.00
44	4.40	0.40	3.30	33.70
46	4.80	0.40	3.60	33.40
48	5.20	0.40	3.90	33.10
50	5.60	0.40	4.20	32.80
52	6.00	0.40	4.50	32.50
54	6.40	0.40	4.80	32.20
56	6.80	0.40	5.10	31.90
58	7.20	0.40	5.40	31.60
60	7.60	0.40	5.70	31.30
62	8.00	0.40	6.00	31.00

Stab (60).

Ndl. 7.0.
Hub 11.50; red. 8.63.
Wdp. ?.

20	0.35		0.26	36.74
22	0.50	0.15	0.38	36.62
24	0.70	0.20	0.53	36.47
26	0.95	0.25	0.71	36.29
28	1.20	0.25	0.90	36.10
30	1.50	0.30	1.13	35.87
32	1.80	0.30	1.35	35.65
34	2.15	0.35	1.61	35.39
36	2.50	0.35	1.88	35.12
38	2.80	0.30	2.10	34.90
40	3.15	0.35	2.36	34.64
42	3.50	0.35	2.63	34.37
44	3.80	0.30	2.85	34.15
46	4.15	0.35	3.11	33.89
48	4.50	0.35	3.38	33.62
50	4.80	0.30	3.60	33.40

Maximalmoment.

Ndl. 7.0.
Hub 1.20; red. 0.90.

Maximalmoment wdh.

Ndl. 6.5.
Hub 1.20; red. 0.90.

Maximalmoment wdh.

Ndl. 6.5.
Hub 0.95; red. 0.71.

Beginn 4 h 34 m.
Schluss 4 h 48 m.

Maximalmoment.

Ndl. 7.0.
Hub 1.00; red. 0.75.

Maximalmoment wdh.

Ndl. 7.0.
Hub 1.00; red. 0.75.

Maximalmoment wdh.

Ndl. 6.5.
Hub 0.95; red. 0.71.

Minimalmoment.

Ndl. 4.5.
Max. 28.5; 6.00; red. 4.50.

Minimalmoment wdh.

Ndl. 5.0.
Max. 28.5; 6.00; red. 4.50.

Minimalmoment wdh.

Ndl. 5.0.
Max. 28.5; 5.95; red. 4.46.

Maximalmoment.

Ndl. 7.0.
Hub 0.80; red. 0.60.

Maximalmoment wdh.

Ndl. 6.5.
Hub 0.75; red. 0.56.

B. Begonnen mit der Reihe der absteigenden Anfangsspannungen.

Versuch LII. 9/XI. 88.

Minimalmoment.

Muskellänge 37 mm.
Muskelmasse 3.301 g.

Reihe der absteigenden Anfangsspannungen.

Beginn 12 h 23 m.
Schluss 12 h 46 m.

Anf.-Sp. 165.85.

Ndl. 11.5.
Max. 36.0; 6.70; red. 5.03.
Arb. 834.23.

Anf.-Sp. 165.85 wdh.

Ndl. 12.0.
Max. 35.5; 6.70; red. 5.03.
Arb. 834.23.

Anf.-Sp. 133.00.

Ndl. 11.5.
Max. 36.5; 7.60; red. 5.40.
Arb. 758.10.

Anf.-Sp. 110.60.

Ndl. 11.0.
Max. 33.5; 7.40; red. 5.55.
Arb. 613.83.

Digitized by Google

Anf.-Sp. 88.82.
Ndl. 11.0.
Max. 34.0.; 7.40; red. 5.55.
Arb. 492.95.

Anf.-Sp. 66.42.
Ndl. 10.0.
Max. 35.0; 7.85; red. 5.89.
Arb. 391.21.

Anf.-Sp. 55.45.
Ndl. 9.0.
Max. 33.5; 7.55; red. 5.66.
Arb. 313.85.

Anf.-Sp. 44.18.
Ndl. 8.0.
Max. 33.5; 7.70; red. 5.78.
Arb. 255.36.

Anf.-Sp. 33.37.
Ndl. 7.5.
Max. 32.0; 7.70; red. 5.78.
Arb. 192.88.

Anf.-Sp. 21.88.
Ndl. 7.0.
Max. 30.0; 7.85; red. 5.89.
Arb. 128.87.

Reihe der aufsteigenden Anfangsspannungen.

Beginn 2 h 52 m.
Schluss 3 h 6 m.

Anf.-Sp. 21.88.
Ndl. 3.5.
Max. 35.0; 5.00; red. 3.75.
Arb. 82.05.

Anf.-Sp. 33.37.
Ndl. 3.5.
Max. 35.0; 4.55; red. 3.41.
Arb. 113.79.

Anf.-Sp. 44.18.
Ndl. 4.0.
Max. 35.5; 4.50; red. 3.38.
Arb. 149.33.

Anf.-Sp. 55.45.
Ndl. 4.5.
Max. 35.0; 3.80; red. 2.85.
Arb. 158.03.

Anf.-Sp. 66.42.
Ndl. 5.0.
Max. 33.5; 3.50; red. 2.63.
Arb. 174.68.

Anf.-Sp. 88.82.
Ndl. 4.5.
Max. 33.5; 2.85; red. 2.14.
Arb. 190.07.

Anf.-Sp. 110.60.
Ndl. 4.5.
Max. 33.5; 2.60; red. 1.95.
Arb. 215.67.

Anf.-Sp. 133.00.
Ndl. 4.0.
Max. 33.0; 1.80; red. 1.35.
Arb. 179.55.

Anf.-Sp. 165.85.
Ndl. 4.0.
Max. 32.0; 1.50; red. 1.13.
Arb. 187.41.

3. Versuche mit extremen Trägheitsmomenten.

Versuch LXII. 19/XI. 88.

Anf.-Sp. 66.42.
Muskellänge 36 mm.
Muskelmasse 3.896 g.

Beginn 11 h 58 m.
Schluss 12 h 47 m.

Minimalmoment.

Ndl.	Max.-Absc.	Max.-Ord.	Max.-Ord. red.
12.5	30.5	10.30	7.73
12.0	31.5	11.00	8.25
13.0	31.0	10.40	7.80
14.0	29.0	11.10	8.33
14.0	29.0	9.85	7.39
13.5	28.0	9.90	7.43

Maximalmoment.

Ndl.	Hub	Hub red.
21.5	1.80	1.35
21.0	2.00	1.50
19.0	2.10	1.58
18.0	1.95	1.46
17.0	2.25	1.69
16.5	2.05	1.54

Minimalmoment.

Ndl.	Max.-Absc.	Max.-Ord.	Max.-Ord. red.
9.0	26.5	9.45	7.09
9.0	26.5	8.95	6.71
9.5	26.0	9.40	7.05
8.5	25.0	8.95	6.71

Beginn 3 h 9 m.
Schluss 3 h 40 m.

Minimalmoment.

Ndl.	Max.-Absc.	Max.-Ord.	Max.-Ord. red.
12.5	27.0	8.70	6.53
12.0	27.0	9.00	6.75
11.5	27.0	8.65	6.48
10.0	26.5	9.35	6.27

Maximalmoment.

Ndl.	Hub	Hub red.
14.0	1.45	1.09
13.5	1.55	1.16
12.5	1.35	1.01
13.5	1.65	1.24

Minimalmoment.

Ndl.	Max.-Absc.	Max.-Ord.	Max.-Ord. red.
7.5	28.0	7.30	5.48
8.0	27.0	7.75	5.81
7.0	26.0	7.60	5.70
7.0	26.0	6.90	5.18

Versuch LIV. 10/XI. 88.

Anf.-Sp. 165.85.
Muskellänge 41 mm.
Muskelmasse 4.313 g.

Maximalmoment.

Ndl.	Hub	Hub red.
17.0	2.05	1.54
17.0	2.10	1.58
16.5	2.20	1.65
16.5	2.20	1.65

Stab (28).

Ndl.	Max.-Absc.	Max.-Ord.	Max.-Ord. red.
17.5	56.0	14.50	10.88
17.0	55.5	14.40	10.80
16.5	55.5	13.70	10.28

Digitized by Google

Minimalmoment.

Ndl.	Max.-Absc.	Max.-Ord.	Max.-Ord. red.
10.5	34.0	9.00	6.75
12.0	33.0	8.45	6.34
13.5	34.0	9.60	7.20
13.0	34.0	9.60	7.20
13.0	32.5	9.60	7.20

Stab (28).

14.5	53.5	13.95	10.46
15.0	52.0	11.90	8.93

Maximalmoment.

Ndl.	Hub	Hub red.
12.0	2.25	1.69
11.5	2.40	1.80
12.5	2.35	1.76
12.0	2.35	1.76

Stab (28).

Ndl.	Max.-Absc.	Max.-Ord.	Max.-Ord. red.
13.0	54.0	11.20	8.40
12.5	53.5	11.10	8.33

Minimalmoment.

9.5	34.0	7.55	5.66
10.5	35.0	7.45	5.59
10.0	35.0	7.45	5.59
10.0	33.5	8.00	6.00

Versuch LV. 12/XI. 88.

Anf.-Sp. 165.85.
Muskellänge 42 mm.
Muskelmasse 4.806 g.

Beginn 3 h 8 m.
Schluss 5 h 35 m.

Minimalmoment.

Ndl.	Max.-Absc.	Max.-Ord.	Max.-Ord. red.
16.5	40.0	11.50	8.63
16.0	40.5	11.55	8.66
16.0	40.0	10.95	8.21

Stab (28).

20.5	59.0	14.60	10.95
20.5	57.0	14.55	10.91

Minimalmoment.

16.0	39.0	11.00	8.25

Maximalmoment.

Ndl.	Hub	Hub red.
19.0	1.80	1.35
18.5	2.40	1.80
17.5	2.30	1.73

Stab (28).

Ndl.	Max.-Absc.	Max.-Ord.	Max.-Ord. red.
17.0	56.5	12.40	9.30
16.0	53.5	12.60	9.45

Maximalmoment.

Ndl.	Hub	Hub red.
16.0	2.10	1.58
16.0	2.30	1.73

Minimalmoment.

Ndl.	Max.-Absc.	Max.-Ord.	Max.-Ord. red.
12.0	36.0	9.05	6.79
12.0	35.5	9.10	6.83
12.5	32.5	9.00	6.75

Stab (18).

Ndl.	Max.-Absc.	Max.-Ord.	Max.-Ord. red.
13.5	45.0	11.00	8.25

Stab (24).

15.0	51.0	10.65	7.99

Stab (28).

14.5	59.0	13.50	10.13

Stab (32).

14.5	65.0	13.00	9.75

Stab (36).

14.0	80.5	15.35	11.51
14.0	79.0	16.10	12.08

Stab (48).

13.5	123.0	20.35	15.26

Stab (60).

13.0	159.0	17.15	12.86

Stab (80).

12.5	199.0	12.30	9.23

Stab (100).

Ndl.	Hub	Hub red.
12.5	8.70	6.53

Stab (122).

12.5	4.80	3.60

Maximalmoment.

12.5	1.60	1.20
12.5	1.75	1.31
12.5	1.75	1.31
12.0	?	?

---

4. Ermüdungsversuche.

Versuch XVIII. 2/VIII. 88.

Anf.-Sp. 66.42.
Muskellänge 31 mm.
Muskelmasse 2.087 g.

Trägheitsmoment Stab (28).

Beginn 4 h 21 m.
Schluss 5 h 5 m.

Ndl. 19.0.
Max. 75.0; 19.95; red. 14.96.
Wdp. 21.0; 6.20; red. 4.65.

10	0.50		0.38	30.62
		0.15		
11	0.65		0.49	30.51
		0.20		

		0.20		
12	0.85		0.64	30.36
		0.25		
13	1.05		0.79	30.21
		0.25		
14	1.30		0.98	30.02
		0.45		
15	1.55		1.16	29.84
		0.45		
16	2.00		1.50	29.50
		0.45		
17	2.45		1.84	29.16
		0.40		
18	2.90		2.18	28.82
		0.45		
19	3.30		2.48	28.52
		0.50		
20	3.75		2.84	28.19
		0.45		
21	4.25		3.19	27.81
		0.50		
22	4.70		3.53	27.47
		0.50		
23	5.20		3.90	27.10
		0.50		
24	5.70		4.28	26.72
		0.50		
25	6.20		4.65	26.35
		0.50		

		0.50		
26	6.70		5.03	25.97
		0.50		
27	7.20		5.40	25.60
		0.50		
28	7.70		5.78	25.22
		0.40		
29	8.10		6.08	24.92
		0.40		
20	8.50		6.38	24.62

Ndl. 17.0.
Max. 73.5; 18.65; red. 13.99.
Wdp. 20.0; 5.50; red. 4.13.

10	1.00		0.75	30.25
		0.50		
11	1.50		1.13	29.87
		0.40		
12	1.90		1.43	29.57
		0.35		
13	2.25		1.69	29.31
		0.45		

Digitized by Google

14	2.70	0.45	2.03	28.97
15	3.05	0.35	2.29	28.71
16	3.55	0.50	2.66	28.34
17	4.05	0.50	3.04	27.96
18	4.55	0.50	3.41	27.59
19	5.05	0.50	3.79	27.21
20	5.50	0.45	4.13	26.87
21	6.00	0.50	4.50	26.50
22	6.50	0.50	4.88	26.12
23	7.00	0.50	5.25	25.75
24	7.40	0.40	5.55	25.45
25	7.85	0.45	5.89	25.11

Ndl. 15.0.
Max. 73.0; 18.00; red. 13.50.
Wdp. 20.0; 4.80; red. 3.60.

10	0.90		0.68	30.32
11	1.20	0.30	0.90	30.10
12	1.50	0.30	1.13	29.87
13	1.85	0.35	1.39	29.61
14	2.20	0.35	1.65	29.35
15	2.60	0.40	1.95	29.05
16	3.00	0.40	2.25	28.75
17	3.45	0.45	2.59	28.41
18	3.90	0.45	2.93	28.07
19	4.35	0.45	3.26	27.74
20	4.80	0.45	3.60	27.40
21	5.25	0.45	3.94	27.06
22	5.70	0.45	4.28	26.72
23	6.15	0.45	4.62	26.38
24	6.55	0.40	4.91	26.09

Ndl. 15.0.
Max. 72.5; 17.00; red. 12.75.
Wdp. 20.5; 4.60; red. 3.45.

10	0.85		0.64	30.36
11	1.05	0.20	0.79	30.21
12	1.30	0.25	0.98	30.02
13	1.60	0.30	1.20	29.80
14	1.95	0.35	1.46	29.54
15	2.35	0.40	1.76	29.24
16	2.70	0.35	2.03	28.97
17	3.10	0.40	2.33	28.67
18	3.50	0.40	2.63	28.37
19	3.90	0.40	2.93	28.07
20	4.40	0.50	3.30	27.70
21	4.80	0.40	3.60	27.40
22	5.25	0.45	3.94	27.06
23	5.70	0.45	4.28	26.72
24	6.15	0.45	4.61	26.39
25	6.60	0.40	4.95	26.05

Ndl. 15.0.
Max. 69.5; 16.10; red. 12.08.
Wdp. 19.5; 3.90; red. 2.93.

10	0.75		0.56	30.44
11	0.95	0.20	0.71	30.29
12	1.15	0.20	0.86	30.14
13	1.40	0.25	1.05	29.95
14	1.70	0.30	1.28	29.72
15	2.10	0.40	1.58	29.42
16	2.50	0.40	1.88	29.12
17	2.90	0.40	2.18	28.82
18	3.30	0.40	2.48	28.52
19	3.70	0.40	2.78	28.22
20	4.10	0.40	3.08	27.92
21	4.55	0.45	3.41	27.59
22	5.00	0.45	3.75	27.25
23	5.40	0.40	4.05	26.95
24	5.80	0.40	4.35	26.65
25	6.20	0.40	4.65	26.35

Ndl. 14.0.
Max. 68.0; 15.40; red. 11.55.
Wdp. 19.0; 4.15; red. 3.11.

10	1.00		0.75	30.25
11	1.30	0.30	0.98	30.02
12	1.60	0.30	1.20	29.80
13	1.90	0.30	1.43	29.57
14	2.20	0.30	1.65	29.35
15	2.55	0.35	1.91	29.09
16	2.90	0.35	2.18	28.82
17	3.30	0.40	2.48	28.52
18	3.70	0.40	2.78	28.22
19	4.15	0.45	3.11	27.89
20	4.60	0.45	3.45	27.55
21	5.00	0.40	3.75	27.25
22	5.40	0.40	4.05	26.95
23	5.80	0.40	4.35	26.65
24	6.20	0.40	4.65	26.35
25	6.55	0.35	4.91	26.09

Ndl. 13.0.
Max. 65.5; 15.00; red. 11.25.
Wdp. 19.0; 4.15; red. 3.11.

10	1.05		0.79	30.21
11	1.30	0.25	0.98	30.02
12	1.65	0.35	1.24	29.76
13	1.95	0.30	1.46	29.54
14	2.25	0.30	1.69	29.31
15	2.55	0.30	1.91	29.09
16	2.95	0.40	2.21	28.79
17	3.30	0.35	2.48	28.52
18	3.75	0.45	2.81	28.19
19	4.15	0.40	3.11	27.89
20	4.55	0.40	3.41	27.59
21	4.95	0.40	3.71	27.29
22	5.35	0.40	4.01	26.99
23	5.85	0.50	4.39	26.61
24	6.25	0.40	4.69	26.31
25	6.55	0.30	4.91	26.09

Ndl. 12.0.
Max. 62.5; 13.95; red. 10.46.
Wdp. 20.0; 4.35; red. 3.26.

10	0.75		0.56	30.44
11	1.00	0.25	0.75	30.25
12	1.30	0.30	0.98	30.02
13	1.60	0.30	1.20	29.80
14	1.95	0.35	1.46	29.54
15	2.30	0.35	1.73	29.27
16	2.65	0.35	1.99	29.01
17	3.05	0.40	2.29	28.71
18	3.50	0.45	2.63	28.37
19	3.90	0.40	2.93	28.07
20	4.35	0.45	3.26	27.74
21	4.70	0.35	3.53	27.47
22	5.10	0.40	3.83	27.17
23	5.55	0.45	4.16	26.84
24	5.95	0.40	4.46	26.54
25	6.35	0.40	4.76	26.24

Ndl. 10.5.
Max. 63.0; 13.70; red. 10.28.
Wdp. 20.0; 4.25; red. 3.19.

10	0.95		0.71	30.29
11	1.15	0.20	0.86	30.14
12	1.40	0.25	1.05	29.95
13	1.70	0.30	1.28	29.72
14	2.05	0.35	1.54	29.46
15	2.40	0.35	1.80	29.20
16	2.75	0.35	2.06	28.94
17	3.10	0 35	2.33	28.67
18	3.45	0.35	2.59	28.41
19	3.85	0.40	2.89	28.11
20	4.25	0.40	3.19	27.81
21	4.65	0.40	3.49	27.51
22	5.05	0.40	3.79	27.21
23	5.45	0.40	4.09	26.91
24	5.85	0.40	4.39	26.61
25	6.25	0.40	4.69	26.31
26	6.65	0.40	4.99	26.01
27	7.00	0.35	5.25	25.75
28	7.30	0.30	5.48	25.52
29	7.60	0.30	5.70	25.30
30	7.90	0.30	5.93	25.07

Ndl. 10.5.
Max. 67.0; 15.10; red. 11.33.
Wdp. 20.5; 4.45; red. 3.34.

10	0.95		0.71	30.29
11	1.15	0.20	0.86	30.14
12	1.40	0.25	1.05	29.95
13	1.70	0.30	1.28	29.72
14	2.00	0.30	1.50	29.50
15	2.35	0.35	1.76	29.24
16	2.70	0.35	2.03	28.97
17	3.10	0.40	2.33	28.67
		0.40		

Digitized by Google

18	3.50	0.40	2.63	28.37
19	3.90	0.40	2.93	28.07
20	4.25	0.35	3.19	27.81
21	4.65	0.40	3.49	27.51
22	5.05	0.40	3.79	27.21
23	5.50	0.45	4.13	26.87
24	5.90	0.40	4.43	26.57
25	6.30	0.40	4.73	26.27
26	6.70	0.40	5.03	25.97
27	7.10	0.40	5.33	25.67
28	7.45	0.35	5.59	25.41
29	7.80	0.35	5.85	25.15
30	8.20	0.40	6.15	24.85
31	8.55	0.35	6.41	24.59
32	8.90	0.35	6.68	24.32
33	9.25	0.35	6.94	24.06
34	9.60	0.35	7.20	23.80
35	9.95	0.35	7.46	23.54

Ndl. 10.5.
Max. 62.5; 13.10; red. 9.83.
Wdp. 21.0; 4.40; red. 3.30.

10	0.80		0.60	30.40
11	1.05	0.25	0.79	30.21
12	1.30	0.25	0.98	30.02
13	1.60	0.30	1.20	29.80
14	1.90	0.30	1.41	29.59
15	2.20	0.30	1.65	29.35
16	2.55	0.35	1.91	29.09
17	2.90	0.35	2.18	28.82
18	3.25	0.35	2.44	28.56
19	3.65	0.40	2.74	28.26
20	4.00	0.35	3.00	28.00
21	4.40	0.40	3.30	27.70
22	4.75	0.35	3.56	27.44
23	5.15	0.40	3.86	27.14
24	5.55	0.40	4.16	26.84
25	5.90	0.35	4.43	26.57
26	6.30	0.40	4.73	26.27
27	6.65	0.35	4.99	26.01
28	7.00	0.35	5.25	25.75
29	7.30	0.30	5.48	25.52
30	7.60	0.30	5.70	25.30

Ndl. 10.0.
Max. 62.0; 12.00; red. 9.00.
Wdp. ?.

15	2.00		1.50	29.50
16	2.30	0.30	1.73	29.27
17	2.60	0.30	1.95	29.05
18	2.95	0.35	2.21	28.79
19	3.30	0.35	2.48	28.52
20	3.65	0.35	2.74	28.26
21	4.05	0.40	3.04	27.96
22	4.40	0.35	3.30	27.70
23	4.75	0.35	3.56	27.44
		0.40		

24	5.15	0.40	3.86	27.14
25	5.50	0.35	4.13	26.87
26	5.80	0.30	4.35	26.65
27	6.15	0.35	4.61	26.39
28	6.40	0.25	4.80	26.20
29	6.75	0.35	5.06	25.94
30	7.10	0.35	5.33	25.67
31	7.40	0.30	5.55	25.45
32	7.70	0.30	5.78	25.22
33	8.05	0.25	6.04	24.96
34	8.25	0.20	6.19	24.81
35	8.50	0.25	6.38	24.62

Ndl. 9.5.
Max. 62.0; 11.45; red. 8.59.
Wdp. 20.5; 3.50; red. 2.63.

10	0.70		0.53	30.47
11	0.80	0.10	0.60	30.40
12	1.00	0.20	0.75	30.25
13	1.20	0.20	0.90	30.10
14	1.50	0.30	1.13	29.87
15	1.70	0.20	1.28	29.72
16	2.00	0.30	1.50	29.50
17	2.30	0.30	1.73	29.27
18	2.60	0.30	1.95	29.05
19	2.95	0.35	2.21	28.79
20	3.30	0.35	2.48	28.52
21	3.65	0.35	2.74	28.26
22	4.00	0.35	3.00	28.00
23	4.35	0.35	3.26	27.74
24	4.65	0.30	3.49	27.51
25	5.00	0.35	3.75	27.25
26	5.30	0.30	3.98	27.02
27	5.60	0.30	4.20	26.80
28	5.90	0.30	4.43	26.57
29	6.20	0.30	4.65	26.35
30	6.50	0.30	4.88	26.12

Ndl. 8.5.
Max. 59.0; 10.90; red. 8.18.
Wdp. 20.0; 3.65; red. 2.74.

10	0.80		0.60	33.40
11	1.00	0.20	0.75	33.25
12	1.25	0.25	0.94	33.06
13	1.50	0.25	1.13	32.87
14	1.80	0.30	1.35	29.65
15	2.05	0.25	1.54	29.46
16	2.35	0.30	1.76	29.24
17	2.65	0.30	1.99	29.01
18	3.00	0.35	2.25	28.75
19	3.35	0.35	2.51	28.49
20	3.65	0.30	2.74	28.26
21	3.95	0.30	2.96	28.04
22	4.30	0.35	3.23	27.77
23	4.65	0.35	3.49	27.51
24	5.00	0.35	3.75	27.25
		0.30		

25	5.30	0.30	3.98	27.02
26	5.65	0.35	4.24	26.76
27	5.95	0.30	4.46	26.54
28	6.25	0.30	4.69	26.31
29	6.55	0.30	4.91	26.09
30	6.80	0.25	5.10	25.90

Ndl. 8.0.
Max. 58.0; 10.40; red. 7.80.
Wdp. 21.0; 3.80; red. 2.85.

10	0.80		0.60	30.40
11	1.00	0.20	0.75	30.25
12	1.25	0.25	0.94	30.06
13	1.50	0.25	1.13	29.87
14	1.75	0.25	1.31	29.69
15	2.00	0.25	1.50	29.50
16	2.25	0.25	1.69	29.31
17	2.55	0.30	1.91	29.09
18	2.85	0.30	2.14	28.86
19	3.15	0.30	2.36	28.64
20	3.50	0.35	2.63	28.37
21	3.80	0.30	2.85	28.15
22	4.05	0.35	3.04	27.96
23	4.40	0.35	3.30	27.70
24	4.70	0.30	3.53	27.47
25	5.05	0.35	3.79	27.21
26	5.35	0.30	4.02	26.98
27	5.65	0.30	4.24	26.76
28	5.85	0.30	4.46	26.54
29	6.20	0.25	4.65	26.35
30	6.45	0.25	4.84	26.16

Ndl. 7.5.
Max. 57.0; 10.20; red. 7.65.
Wdp. 19.0; 3.30; red. 2.48.

10	0.90		0.68	30.32
11	1.10	0.20	0.83	30.17
12	1.30	0.20	0.98	30.02
13	1.50	0.20	1.13	29.87
14	1.75	0.25	1.31	29.69
15	2.05	0.30	1.54	29.46
16	2.35	0.30	1.76	29.24
17	2.65	0.30	1.99	29.01
18	2.95	0.30	2.21	28.79
19	3.30	0.35	2.48	28.52
20	3.60	0.30	2.70	28.30
21	3.90	0.30	2.93	28.07
22	4.20	0.30	3.15	27.85
23	4.50	0.30	3.38	27.62
24	4.80	0.30	3.60	27.40
25	5.05	0.25	3.79	27.21

Ndl. 7.5.
Max. 56.5; 9.80; red. 7.35.
Wdp. 19.0; 3.00; red. 2.25.

Digitized by Google

10	0.85	0.15	0.64	30.36
11	1.00	0.20	0.75	30.25
12	1.20	0.20	0.90	30.10
13	1.40	0.20	1.05	29.95
14	1.60	0.30	1.20	29.80
15	1.90	0.25	1.43	29.57
16	2.15	0.30	1.61	29.39
17	2.45	0.25	1.84	29.16
18	2.70	0.30	2.03	28.97
19	3.00	0.30	2.25	28.75
20	3.30	0.30	2.48	28.52
21	3.60	0.30	2.70	28.30
22	3.90	0.30	2.93	28.07
23	4.20	0.30	3.15	27.85
24	4.50	0.25	3.38	27.62
25	4.75		3.56	27.44

Ndl. 7.5.
Max. 54.5; 9.00; red. 6.75.
Wdp. 20.0; 3.10; red. 2.33.

10	0.60	0.20	0.45	30.55
11	0.80	0.20	0.60	30.40
12	1.00	0.20	0.75	30.25
13	1.20	0.25	0.90	30.10
14	1.45	0.25	1.09	29.91
15	1.70	0.30	1.28	29.72
16	2.00	0.30	1.50	29.50
17	2.30	0.25	1.73	29.27
18	2.55	0.30	1.91	29.09
19	2.85	0.25	2.14	28.86
20	3.10	0.30	2.33	28.67
21	3.40	0.30	2.55	28.45
22	3.70	0.30	2.78	28.22
23	4.00	0.30	3.00	28.00
24	4.30	0.30	3.23	27.77
25	4.60	0.30	3.45	27.55
26	4.90	0.25	3.68	27.32
27	5.15	0.25	3.86	27.14
28	5.40	0.20	4.05	26.95
29	5.60	0.25	4.20	26.80
30	5.85		4.39	26.61

Ndl. 7.5.
Max. 54.0; 8.35; red. 6.26.
Wdp. 16.5; 1.75; red. 1.31.

10	0.40	0.15	0.30	30.70
11	0.55	0.15	0.41	30.59
12	0.70	0.20	0.53	30.47
13	0.90	0.25	0.68	30.32
14	1.15	0.20	0.86	30.14
15	1.35	0.25	1.01	29.90
16	1.60	0.30	1.20	29.80
17	1.90	0.25	1.43	29.57
18	2.15	0.25	1.61	29.39
19	2.40	0.20	1.80	29.20
20	2.60	0.20	1.95	29.05
12	2.80		2.10	28.90

Ndl. 7.5.
Max. 52.0; 8.10; red. 6.08.
Wdp. 19.0; 2.80; red. 2.10.

10	0.65	0.15	0.49	30.51
11	0.80	0.25	0.60	30.40
12	1.05	0.25	0.79	30.21
13	1.30	0.20	0.97	30.03
14	1.50	0.25	1.13	29.87
15	1.75	0.25	1.31	29.69
16	2.00	0.25	1.50	29.50
17	2.25	0.30	1.69	29.31
18	2.55	0.25	1.91	29.09
19	2.80	0.30	2.10	28.90
20	3.10	0.30	2.33	28.67
21	3.40	0.20	2.55	28.45
22	3.60	0.30	2.70	28.30
23	3.90	0.30	2.93	28.07
24	4.20	0.25	3.15	27.85
25	4.45	0.25	3.34	27.66
26	4.70	0.30	3.53	27.47
27	5.00	0.20	3.75	27.25
28	5.20	0.20	3.90	27.10
29	5.40	0.20	4.05	26.95
30	5.60		4.20	26.80

Ndl. 7.0.
Max. 51.5; 8.00; red. 6.00.
Wdp. 15.5; 1.90; red. 1.43.

10	0.75	0.15	0.56	30.44
11	0.90	0.20	0.68	30.32
12	1.10	0.20	0.83	30.17
13	1.30	0.20	0.98	30.02
14	1.50	0.25	1.13	29.87
15	1.75	0.30	1.31	29.69
16	2.05	0.25	1.54	29.46
17	2.30	0.20	1.73	29.27
18	2.50	0.20	1.88	29.12
19	2.70	0.20	2.03	28.97
20	2.90		2.18	28.82

Ndl. 7.0.
Max. 51.0; 7.50; red. 5.63.
Wdp. 17.5; 2.15; red. 1.61.

10	0.55	0.20	0.41	30.59
11	0.75	0.20	0.56	30.44
12	0.95	0.20	0.71	30.29
13	1.15	0.20	0.85	30.14
14	1.35	0.20	1.01	29.99
15	1.55	0.20	1.16	29.84
16	1.75	0.25	1.31	29.69
17	2.00	0.30	1.50	29.50
18	2.30	0.25	1.73	29.27
19	3.55	0.25	1.91	29.09
20	3.80	0.25	2.10	28.90
21	3.05	0.30	2.29	28.71
22	3.35	0.25	2.51	28.49

		0.25		
23	3.60	0.25	2.70	28.30
24	3.85	0.25	2.89	28.11
25	4.10		3.08	27.92

Ndl. 7.0.
Max. 49.5; 7.15; red. 5.36.
Wdp. 15.5; 1.75; red. 1.31.

10	0.50	0.15	0.38	30.62
11	0.65	0.20	0.49	30.51
12	0.85	0.20	0.64	30.36
13	1.05	0.20	0.79	30.21
14	1.25	0.35	0.94	30.06
15	1.60	0.30	1.20	29.80
16	1.90	0.30	1.43	29.57
17	2.20	0.20	1.65	29.35
18	2.40	0.20	1.80	29.20
19	2.60		1.95	29.05

Ndl. 7.0.
Max. 49.0; 6.85; red. 5.14.
Wdp. 17.0; 1.85; red. 1.39.

10	0.50	0.15	0.38	30.62
11	0.65	0.15	0.49	30.51
12	0.80	0.20	0.60	30.40
13	1.00	0.20	0.75	30.25
14	1.20	0.20	0.90	30.10
15	1.40	0.20	1.05	29.95
16	1.60	0.25	1.20	29.80
17	1.85	0.25	1.39	29.61
18	2.10	0.20	1.58	29.42
19	2.30	0.20	1.73	29.27
20	2.50	0.20	1.88	29.12
21	2.70	0.20	2.03	28.97
22	2.90	0.20	2.18	28.82
23	3.10	0.20	2.33	28.67
24	3.30	0.20	2.48	28.52
25	3.50		2.63	28.37

Ndl. 7.0.
Max. 48.5; 6.65; red. 4.99.

Ndl. 6.5.
Max. 46.0; 6.15; red. 4.61.

Ndl. 6.0.
Max. 45.0; 6.10; red. 4.58.

Ndl. 5.0.
Max. 44.0; 6.00; red. 4.50.

Ndl. 5.5.
Max. 42.0; 6.00; red. 4.50.

Digitized by Google

Versuch LXIV. 21/XI. 88.

Anf.-Sp. 21.88.
Muskellänge 39 mm.
Muskelmasse 3.381 g.

Beginn 11 h 6 m.
Schluss 11 h 23 m.

Minimalmoment.

Ndl. 12.0.
Max. 28.0; 13.00; red. 9.75.
Wdp. 10.5; 4.90; red. 3.68.

6	1.35	0.70	1.01	37.99
7	2.05	0.75	1.54	37.46
8	2.80	0.85	2.10	36.90
9	3.65	0.85	2.74	36.26
10	4.50	0.85	3.38	35.62
11	5.35	0.85	4.01	34.99
12	6.20	0.85	4.65	34.35
13	7.05	0.70	5.29	33.71
14	7.75	0.70	5.81	33.19
15	8.45		6.34	32.66

Ndl. 11.5.
Max. 28.5; 12.50; red. 9.38.
Wdp. 10.5; 4.10; red. 3.08.

6	0.50	0.65	0.38	38.62
7	1.15	0.80	0.86	38.14
8	1.95	0.90	1.46	37.54
9	2.85	0.85	2.14	36.86
10	3.70	0.80	2.78	36.22
11	4.50	0.80	3.38	35.62
12	5.30	0.85	3.98	35.02
13	6.15	0.85	4.61	34.39
14	7.00	0.65	5.25	33.75
15	7.65		5.74	33.26

Ndl. 11.5.
Max. 26.0; 13.00; red. 9.75.
Wdp. 10.0; 5.20; red. 3.90.

4	0.40	0.60	0.30	38.70
5	1.00	0.75	0.75	38.25
6	1.75	0.80	1.31	37.69
7	2.55	0.90	1.91	37.09
8	3.45	0.85	2.59	36.41
9	4.30	0.90	3.23	35.77
10	5.20	0.85	3.90	35.10
11	6.05	0.90	4.54	34.46
12	6.95	0.65	5.21	33.79
13	7.60		5.70	33.30

Ndl. 12.0.
Max. 26.5; 12.00; red. 9.00.
Wdp. 10.5; 3.95; red. 2.96.

6	0.50	0.60	0.38	38.62
7	1.10	0.70	0.83	38.17
8	1.80	0.85	1.35	37.65
9	2.65	0.75	1.99	37.01
10	3.40	0.85	2.55	36.45
11	4.25	0.80	3.19	35.81
12	5.05	0.85	3.79	35.21
13	5.90	0.75	4.43	34.57
14	6.65	0.70	4.99	34.01
15	7.35		5.51	33.49

Ndl. 11.5.
Max. 25.5; 13.00; red. 9.75.
Wdp. 10.0; 5.30; red. 3.98.

4	0.35	0.60	0.26	38.74
5	0.95	0.85	0.71	38.29
6	1.80	0.85	1.35	37.65
7	2.65	0.85	1.99	37.01
8	3.50	0.90	2.63	36.37
9	4.40	0.90	3.30	35.70
10	5.30	0.90	3.98	35.02
11	6.20	0.90	4.65	34.35
12	7.10	0.75	5.33	33.67
13	7.85	0.70	5.89	33.11
14	8.55	0.55	6.41	32.59
15	9.10		6.83	32.17

Ndl. 11.0.
Max. 26.0; 11.80; red. 8.85.
Wdp. 10.5; 5.30; red. 3.98.

5	0.30	0.65	0.23	38.77
6	0.95	0.95	0.71	38.29
7	1.90	0.95	1.41	37.59
8	2.85	0.95	2.14	36.86
9	3.80	1.00	2.85	36.15
10	4.80	1.00	3.60	35.40
11	5.80	1.00	4.35	34.65
12	6.80	0.90	5.10	33.90
13	7.70		5.78	33.22

Ndl. 11.5.
Max. 27.5; 13.00; red. 9.75.
Wdp. 10.0; 4.30; red. 3.23.

5	0.40	0.60	0.30	38.70
6	1.00	0.70	0.75	38.25
7	1.70	0.80	1.28	37.72
8	2.50	0.90	1.88	37.12
9	3.40	0.90	2.55	36.45
10	4.30	0.90	3.23	35.77
11	5.20	0.90	3.90	35.10
12	6.10	0.80	4.58	34.42
13	6.90		5.18	33.82

Ndl. 10.5.
Max. 25.5; 11.55; red. 8.67.
Wdp. 10.5; 4.70; red. 3.53.

5	0.35	0.65	0.26	38.74
6	1.00	0.75	0.75	38.25
7	1.75	0.80	1.31	37.69
8	2.55	0.85	1.91	37.09
9	3.40	0.85	2.55	36.45
10	4.25	0.85	3.19	35.81
11	5.10	0.90	3.83	35.17
12	6.00	0.80	4.50	34.50
13	6.80	0.70	5.10	33.90
14	7.50		5.63	33.37

Ndl. ?.
Max. 20.5; 8.70 (?); red. 6.53.
Wdp. 9.0; 3.70; red. 2.78.

4	0.20	0.50	0.15	38.85
5	0.70	0.70	0.53	38.47
6	1.40	0.75	1.05	37.95
7	2.15	0.75	1.61	37.39
8	2.90	0.80	2.18	36.82
9	3.70	0.80	2.78	36.22
10	4.50	0.75	3.38	35.62
11	5.25		3.94	35.06

Ndl. 10.0.
Max. 25.0; 12.00; red. 9.00.
Wdp. 9.0; 4.10; red. 3.08.

4	0.30	0.60	0.23	38.77
5	0.90	0.70	0.68	38.32
6	1.60	0.90	1.20	37.80
7	2.50	0.80	1.88	37.12
8	3.30	0.80	2.48	36.52
9	4.10	0.80	3.08	35.92
10	4.90	0.90	3.68	35.32
11	5.80	0.80	4.35	34.65
12	6.60	0.70	4.95	34.05
13	7.30		5.48	33.52

Ndl. 10.5.
Max. 23.5; 12.55; red. 9.41.
Wdp. 8.5; 3.20; red. 2.40.

5	0.30	0.60	0.23	38.77
6	0.90	0.85	0.68	38.32
7	1.75	0.95	1.31	37.69
8	2.70	1.00	2.03	36.97
9	3.70	0.90	2.78	36.22
10	4.60	0.90	3.45	35.55
11	5.50	0.85	4.13	34.87
12	6.35	0.80	4.76	34.24
13	7.15		5.36	33.64

Ndl. 10.0.
Max. 22.5; 11.50; red. 8.63.
Wdp. 8.5; 4.70; red. 3.53.

4	0.60	0.75	0.45	38.55
5	1.35	0.95	1.01	37.99
6	2.30	0.90	1.73	37.27

Digitized by Google

7	3.20	0.90	2.40	36.60
8	4.20	1.00	3.15	35.85
9	5.20	1.00	3.90	35.10
10	6.20	1.00	4.65	34.35
11	7.05	0.85	5.29	33.71

Ndl. 10.0.
Max. 22.0; 11.45; red. 8.59.
Wdp. 7.5; 3.90; red. 2.93.

4	0.75	0.85	0.56	38.44
5	1.60	0.85	1.20	37.80
6	2.45	0.95	1.84	37.16
7	3.40	0.95	2.55	36.45
8	4.35	0.95	3.26	35.74
9	5.30	0.90	3.98	35.02
10	6.20	0.90	4.65	34.35
11	7.10		5.33	33.67

Beginn 12 h 26 m.
Schluss 12 h 43 m.

Ndl. 11.5.
Max. 27.0; 11.60; red. 8.70.
Wdp. 10.0; 4.15; red. 3.12.

5	0.85	0.50	0.64	38.36
6	1.35	0.70	1.01	37.99
7	2.05	0.65	1.54	37.46
8	2.70	0.75	2.03	36.97
9	3.45	0.70	2.59	36.41
10	4.15	0.80	3.11	35.89
11	4.95	0.75	3.71	35.29
12	5.70	0.70	4.28	34.72
13	6.40	0.60	4.80	34.20
14	7.00		5.25	33.75

Ndl. 12.0.
Max. 26.5; 10.00; red. 7.50.
Wdp. 11.0; 3.80; red. 2.85.

6	0.60	0.60	0.45	38.55
7	1.20	0.60	0.90	38.10
8	1.80	0.60	1.35	37.65
9	2.40	0.70	1.80	37.20
10	3.10	0.70	2.33	36.67
11	3.80	0.65	2.85	36.15
12	4.45	0.65	3.34	35.66
13	5.10	0.70	3.83	35.17
14	5.80	0.60	4.35	34.65
15	6.40		4.80	34.20

Ndl. 11.5.
Max. 26.0; 10.50; red. 7.88.
Wdp. 9.5; 3.65; red. 2.74.

5	0.60	0.60	0.45	38.55
6	1.20	0.60	0.90	38.10
7	1.80	0.70	1.35	37.65
8	2.50	0.80	1.88	37.12

9	3.30	0.80	2.48	36.52
10	4.00	0.70	3.00	36.00
11	4.70	0.70	3.53	35.47
12	5.45	0.75	4.09	34.91
13	6.10	0.65	4.58	34.42
14	6.70	0.60	5.03	33.97
15	7.20	0.50	5.40	33.60

Ndl. 11.5.
Max. 26.5; 10.00; red. 7.50.
Wdp. 10.0; 3.05; red. 2.29.

6	0.50	0.50	0.38	38.62
7	1.00	0.65	0.75	38.25
8	1.65	0.65	1.24	37.76
9	2.30	0.75	1.73	37.27
10	3.05	0.75	2.29	36.71
11	3.80	0.70	2.85	36.15
12	4.50	0.70	3.38	35.62
13	5.20	0.65	3.90	35.10
14	5.85	0.60	4.39	34.61
15	6.45		4.84	34.16

Ndl. 11.0.
Max. 25.5; 10.05; red. 7.54.
Wdp. 8.5; 2.20; red. 1.65.

6	0.30	0.60	0.23	38.77
7	0.90	0.80	0.68	38.32
8	1.70	0.95	1.28	37.72
9	2.65	0.75	1.99	37.01
10	3.40	0.80	2.55	36.45
11	4.20	0.70	3.15	35.85
12	4.90	0.70	3.68	35.32
13	5.60	0.65	4.20	34.80
14	6.25		4.69	34.31

Ndl. 10.5.
Max. 26.0; 10.60; red. 7.95.
Wdp. 9.5; 3.65; red. 2.74.

5	0.60	0.60	0.45	38.55
6	1.20	0.65	0.90	38.10
7	1.85	0.65	1.39	37.61
8	2.50	0.75	1.88	37.12
9	3.25	0.75	2.44	36.56
10	4.00	0.75	3.00	36.00
11	4.75	0.70	3.56	35.44
12	5.45	0.60	4.09	34.91
13	6.05		4.54	34.46

Ndl. 9.5.
Max. 26.5; 9.50; red. 7.13.
Wdp. 10.0; 2.80; red. 2.10.

6	0.40	0.50	0.30	38.70
7	0.90	0.50	0.68	38.32
8	1.40	0.70	1.05	37.95
9	2.10	0.70	1.58	37.42

10	2.80	0.70	2.10	36.90
11	3.50	0.70	2.63	36.37
12	4.20	0.70	3.15	35.85
13	4.85	0.65	3.64	35.36
14	5.50	0.65	4.13	34.87
15	6.00	0.50	4.50	34.50

Ndl. 9.0.
Max. 25.5; 9.20; red. 6.90.
Wdp. 10.0; 3.20; red. 2.40.

6	0.50	0.55	0.38	38.62
7	1.05	0.60	0.79	38.21
8	1.65	0.75	1.24	37.76
9	2.40	0.80	1.80	37.20
10	3.20	0.60	2.40	36.60
11	3.80	0.75	2.85	36.15
12	4.55	0.65	3.41	35.59
13	5.20		3.90	35.10

Ndl. 8.5.
Max. 25.5; 9.80; red. 7.35.
Wdp. 9.0; 3.00; red. 2.25.

5	0.35	0.60	0.26	38.74
6	0.90	0.65	0.68	38.32
7	1.60	0.65	1.20	37.80
8	2.25	0.75	1.69	37.31
9	3.00	0.75	2.25	36.75
10	3.75	0.70	2.81	36.19
11	4.45	0.65	3.34	35.66
12	5.10	0.65	3.83	35.17
13	5.75	0.60	4.31	34.69
14	6.35		4.76	34.24

Ndl. 8.5.
Max. 25.5; 9.10; red. 6.83.
Wdp. 9.0; 3.00; red. 2.25.

6	1.05	0.65	0.79	38.21
7	1.70	0.60	1.28	37.72
8	2.30	0.70	1.73	37.27
9	3.00	0.70	2.25	36.75
10	3.70	0.70	2.78	36.22
11	4.40	0.65	3.30	35.70
12	5.05		3.79	35.21

Ndl. 8.0.
Max. 24.5; 9.00; red. 6.75.
Wdp. 9.0; 3.00; red. 2.25.

5	0.50	0.60	0.38	38.62
6	1.10	0.60	0.83	38.17
7	1.70	0.60	1.28	37.72
8	2.30	0.70	1.73	37.27
9	3.00	0.70	2.25	36.75
10	3.70	0.65	2.78	36.22
11	4.35	0.65	3.26	35.74
12	5.00	0.55	3.75	35.25
13	5.55		4.16	34.84

Digitized by Google

Ndl. 8.0.
Max. 26.0; 9.10; red. 6.83.
Wdp. 9.5; 3.20; red. 2.40.

5	0.55	0.40	0.41	38.59
6	0.95	0.55	0.71	38.29
7	1.50	0.70	1.13	37.87
8	2.20	0.65	1.65	37.35
9	2.85	0.65	2.14	36.86
10	3.50	0.70	2.63	36.37
11	4.20	0.70	3.15	35.85
12	4.90	0.60	3.68	35.32
13	5.50	0.50	4.13	34.87
14	6.00		4.50	34.50

Ndl. 7.5.
Max. 25.5; 9.00; red. 6.75.
Wdp. 9.5; 3.35; red. 2.51.

5	0.50	0.60	0.38	38.62
6	1.10	0.60	0.83	38.17
7	1.70	0.60	1.28	37.72
8	2.30	0.70	1.73	37.28
9	3.00	0.70	2.25	36.75
10	3.70	0.70	2.78	36.22
11	4.40	0.60	3.30	35.70
12	5.00		3.75	35.24

Ndl. 7.5.
Max. 25.0; 8.85; red. 6.64.
Wdp. 9.0; 2.60; red. 1.95.

6	0.75	0.60	0.56	38.44
7	1.35	0.55	1.01	37.99
8	1.90	0.70	1.43	37.57
9	2.60	0.65	1.95	37.05
10	3.25	0.55	2.44	36.56
11	3.90	0.65	2.93	36.07
12	4.55		3.41	35.59

Ndl. 7.0.
Max. 22.0; 8.80; red. 6.60.
Wdp. 8.0; 3.00; red. 2.25.

4	0.35	0.45	0.26	38.74
5	0.80	0.70	0.60	38.40
6	1.50	0.75	1.13	37.87
7	2.25	0.75	1.69	37.31
8	3.00	0.75	2.25	36.75
9	3.75	0.75	2.81	36.19
10	4.50	0.70	3.38	35.62
11	5.20		3.90	35.10

Beginn 3 h 29 m.
Schluss 3 h 54 m.

Minimalmoment.

Ndl. 5.0.
Max. 24.0; 8.00; red. 6.00.
Wdp. 10.0; 3.00; red. 2.25.

Minimalmoment wdh.

Ndl. 5.5.
Max. 24.0; 7.70; red. 5.78.
Wdp. 10.0; 2.85; red. 2.14.

Minimalmoment wdh.

Ndl. 5.0.
Max. 25.0; 7.55; red. 5.66.
Wdp 10.0; 2.80; red. 2.10.

Stab (18).

Ndl. 6.0.
Max. 74.0; 17.40; red. 13.05.
Wdp. 25.0; 6.40; red. 4.80.

Stab (18) wdh.

Ndl. 6.0.
Max. 70.0; 16.40; red. 12.30.
Wdp. 24.0; 6.10; red. 4.58.

Stab (24).

Ndl. 6.5.
Max. 109.0; 19.25; red. 14.44.
Wdp. 29.0; 5.70; red. 4.28.

Stab (28).

Ndl. 6.5.
Max. 132.0; 18.25; red. 13.69.
Wdp. 34.0; 5.05; red. 3.79.

Stab (32).

Ndl. 6.5.
Max. 143.0; 15.70; red. 11.78.
Wdp. 36.0; 4.65; red. 3.49.

Stab (36).

Ndl. 6.5.
Max. 182.0; 18.00; red. 13.50(!).
Wdp. 38.0; 4.20; red. 3.15.

Stab (40).

Ndl. 6.5.
Hub 9.50; red. 7.13.
Wdp. 36.0; 2.15; red. 1.61.

Stab (48).

Ndl. 6.0.
Hub 4.80; red. 3.60.

Stab (60).

Ndl. 5.5.
Hub 4.10; red. 3.08.

Maximalmoment.

Ndl. 4.5.
Hub 0.35; red. 0.26.

Versuch LXV. 22/XI. 88.

Anf.-Sp. 66.12.
Muskellänge 41 mm.
Muskelmasse 3.909 g.

Maximalmoment.

Beginn 11 h 43 m.
Schluss 12 h 3 m.

Ndl.	Hub	Hub red.
28.0	3.80	2.85
20.0	3.80	2.85
18.0	3.75	2.81
16.0	3.65	2.74
14.0	3.40	2.55
13.5	3.50	2.63
14.0	3.70	2.78
14.0	3.65	2.74
13.0	3.60	2.70
13.0	3.30	2.48
13.0	3.10	2.33
12.0	2.95	2.21
11.5	2.60	1.95
11.5	3.00	2.25

Beginn 12 h 13 m.
Schluss 12 h 29 m.

13.0	1.85	1.39
12.0	1.95	1.46
10.5	1.90	1.43
10.5	2.10	1.58
10.5	1.95	1.46
9.5	2.05	1.54
9.0	2.05	1.54
9.5	2.05	1.54
9.5	2.05	1.54
9.0	1.90	1.43
9.5	1.85	1.39
9.0	1.95	1.46
9.5	1.85	1.39
9.5	2.05	1.54
9.0	1.85	1.39

Beginn 3 h 4 m.
Schluss 3 h 18 m.

8.0	1.15	0.86
7.5	1.20	0.90
7.0	1.10	0.83
6.5	1.10	0.83
6.0	0.90	0.68
6.5	1.10	0.83
6.5	1.15	0.86
6.5	1.10	0.83
6.0	1.05	0.79
5.5	0.95	0.71
5.5	0.85	0.64

Digitized by Google

Ndl.	Hub	Hub red.
5.0	0.80	0.60
5.0	0.85	0.64
5.5	1.05	0.79
5.0	0.85	0.64
5.5	0.90	0.68
5.0	0.85	0.64

Beginn 3 h 24 m.
Schluss 3 h 32 m.

Minimalmoment.

Ndl.	Max.-Absc.	Max.-Ord.	Max.-Ord. red.
5.5	30.0	5.70	4.28
5.0	30.5	6.10	4.58
5.0	30.0	5.95	4.46
5.0	29.0	5.70	4.28
5.0	30.0	5.70	4.28
4.5	30.0	6.10	4.58
4.5	30.5	6.25	4.69
4.0	31.0	5.60	4.20
4.0	26.5	5.60	4.20

Versuch LXVI. 24/XI. 88.

Anf.-Sp. 165.85.
Muskellänge 37 mm.
Muskelmasse 3.119 g.

Beginn 11 h 32 m.
Schluss 12 h 21 m.

Trägheitsmoment Stab (28).

Ndl. 27.0.
Max. 55.0; 13.00; red. 9.75.
Wdp. 29.0; 7.10; red. 5.33.

10	0.55		0.41	36.59
12	0.80	0.25	0.60	36.40
14	1.30	0.50	0.98	36.02
16	1.85	0.55	1.39	35.61
18	2.50	0.65	1.88	35.12
20	3.30	0.80	2.48	34.52
22	4.15	0.85	3.11	33.89
24	5.00	0.85	3.75	33.25
26	5.80	0.80	4.35	32.65
28	6.65	0.85	4.99	32.01
30	7.55	0.90	5.66	31.34
32	8.35	0.80	6.26	30.74
34	9.05	0.70	6.79	30.21

Ndl. 24.0.
Max. 54.5; 12.75; red. 9.56.
Wdp. 27.0; 6.25; red. 4.69.

12	0.90		0.68	36.32
14	1.30	0.40	0.98	36.02
		0.60		
16	1.90		1.43	35.57
18	2.65	0.75	1.99	35.01
20	3.40	0.75	2.55	34.45
22	4.20	0.80	3.15	33.85
24	4.95	0.75	3.71	33.29
26	5.80	0.85	4.35	32.65
28	6.65	0.85	4.99	32.01
30	7.50	0.85	5.63	31.37
32	8.25	0.75	6.19	30.81
34	9.00	0.75	6.75	30.25

Ndl. 21.5.
Max. 55.0; 12.30; red. 9.23.
Wdp. 24.0; 5.30; red. 3.98.

10	0.50		0.38	36.62
12	0.85	0.35	0.64	36.36
14	1.40	0.55	1.05	35.95
16	2.00	0.60	1.50	35.50
18	2.75	0.75	2.06	34.94
20	3.50	0.75	2.63	34.37
22	4.40	0.90	3.30	33.70
24	5.30	0.90	3.98	33.02
26	6.15	0.85	4.61	32.39
28	7.05	0.90	5.29	31.71
30	7.80	0.75	5.85	31.15
32	8.60	0.80	6.45	30.55
34	9.40	0.80	7.05	29.95
36	10.10	0.70	7.58	29.42

Ndl. 18.5.
Max. 53.0; 11.85; red. 8.89.
Wdp. 25.0; 4.70; red. 3.53.

12	0.60		0.45	36.55
14	0.90	0.30	0.68	36.32
16	1.50	0.60	1.13	35.87
18	2.10	0.60	1.58	35.42
20	2.70	0.60	2.03	34.97
22	3.50	0.60	2.63	34.37
24	4.30	0.80	3.23	33.77
26	5.10	0.80	3.83	33.17
28	5.90	0.80	4.43	32.57
30	6.60	0.70	4.95	32.05
32	7.30	0.70	5.48	31.52

Ndl. 16.5.
Max. 51.0; 11.50; red. 8.63.
Wdp. 23.0; 4.60; red. 3.45.

10	0.50		0.38	36.62
11	0.65	0.15	0.49	36.51
12	0.85	0.20	0.64	36.36
13	1.10	0.25	0.83	36.17
14	1.35	0.25	1.01	35.99
15	1.65	0.30	1.24	35.72
16	1.90	0.25	1.43	35.57
17	2.20	0.30	1.65	35.35
18	2.60	0.40	1.95	35.05
		0.40		
19	3.00		2.25	34.75
20	3.40	0.40	2.55	34.45
21	3.80	0.40	2.85	34.15
22	4.20	0.40	3.15	33.85
23	4.60	0.40	3.45	33.55
24	5.00	0.40	3.75	33.25
25	5.40	0.40	4.05	32.95
26	5.80	0.40	4.35	32.65
27	6.20	0.40	4.65	32.35
28	6.60	0.40	4.95	32.05
29	7.00	0.40	5.25	31.75
30	7.35	0.35	5.51	31.49
31	7.70	0.35	5.78	31.22

Ndl. 15.5.
Max. 50.5; 10.55; red. 7.91.
Wdp. 23.5; 4.15; red. 3.11.

10	0.25		0.19	36.81
11	0.35	0.10	0.26	36.74
12	0.50	0.15	0.38	36.62
13	0.70	0.20	0.53	36.47
14	0.90	0.20	0.68	36.32
15	1.20	0.30	0.90	36.10
16	1.50	0.30	1.13	35.87
17	1.80	0.30	1.35	35.65
18	2.10	0.30	1.58	35.42
19	2.45	0.35	1.84	35.16
20	2.80	0.35	2.10	34.90
21	3.15	0.35	2.36	34.64
22	3.55	0.40	2.66	34.34
23	3.95	0.40	2.96	34.04
24	4.35	0.40	3.26	33.74
25	4.70	0.35	3.53	33.47
26	5.10	0.40	3.83	33.17
27	5.50	0.40	4.13	32.87
28	5.85	0.35	4.39	32.61
29	6.20	0.35	4.65	32.35
30	6.50	0.30	4.88	32.12

Ndl. 15.0.
Max. 50.5; 10.15; red. 7.62.
Wdp. 23.0; 3.70; red. 2.78.

14	0.80		0.60	36.40
16	1.30	0.50	0.97	36.03
18	1.90	0.60	1.42	35.58
20	2.55	0.65	1.92	35.08
22	3.30	0.75	2.47	34.53
24	4.10	0.80	3.08	33.92
26	4.85	0.75	3.64	33.36
28	5.55	0.70	4.17	32.83
30	6.20	0.65	4.65	32.35
32	6.80	0.60	5.10	31.90

Ndl. 15.5.
Max. 49.5; 11.05; red. 8.29.
Wdp. 22.0; 4.55; red. 3.41.

Digitized by Google

12	1.20	0.45	0.90	36.10
14	1.65	0.70	1.24	35.76
16	2.35	0.70	1.76	35.24
18	3.05	0.75	2.29	34.71
20	3.80	0.75	2.85	34.15
22	4.55	0.75	3.41	33.59
24	5.30	0.75	3.98	33.02
26	6.05	0.70	4.54	32.46
28	6.75	0.70	5.06	31.94
30	7.45	0.65	5.51	31.49
32	8.10	0.65	6.08	30.92
34	8.75		6.56	30.44

Ndl. 14.5.
Max. 47.5; 10.00; red. 7.50.
Wdp. 22.0; 4.10; red. 3.08.

12	0.90	0.45	0.68	36.32
14	1.35	0.65	1.01	35.99
16	2.00	0.65	1.50	35.50
18	2.65	0.70	1.99	35.01
20	3.35	0.75	2.51	34.49
22	4.10	0.75	3.08	33.92
24	4.85	0.70	3.64	33.36
26	5.55	0.65	4.16	32.84
28	6.20	0.65	4.65	32.35
30	6.85		5.14	31.86

Ndl. 14.0.
Max. 44.5; 10.65; red. 7.99.
Wdp. 20.0; 4.30; red. 3.23.

10	0.60	0.65	0.45	36.55
12	1.25	0.65	0.94	36.06
14	1.90	0.70	1.43	35.57
16	2.60	0.85	1.95	35.05
18	3.45	0.85	2.59	34.41
20	4.30	0.85	3.23	33.77
22	5.15	0.85	3.86	33.14
24	6.00	0.80	4.50	32.50
26	6.80	0.80	5.10	31.90
28	7.60	0.65	5.70	31.30
30	8.25		6.19	30.81

Ndl. 13.0.
Max. 44.5; 9.95; red. 7.46.
Wdp. 20.5; 4.15; red. 3.11.

10	0.60	0.20	0.45	36.55
11	0.80	0.25	0.60	36.40
12	1.05	0.30	0.79	36.21
13	1.35	0.30	1.01	35.99
14	1.65	0.35	1.24	35.76
15	2.00	0.40	1.50	35.50
16	2.40	0.40	1.80	35.20
17	2.80	0.35	2.10	34.90
18	3.15	0.35	2.36	34.64
19	3.50	0.40	2.63	34.37
20	3.90	0.45	2.93	34.07
21	4.35	0.40	3.26	33.74

		0.40		
22	4.75	0.40	3.56	33.44
23	5.15	0.40	3.86	33.14
24	5.55	0.40	4.16	32.84
25	5.95	0.35	4.46	32.54
26	6.30	0.35	4.73	32.27
27	6.65	0.35	4.99	32.01
28	7.00	0.30	5.25	31.75
29	7.30	0.30	5.48	31.52
30	7.60		5.70	31.30

Beginn 12 h 31 m.
Schluss 12 h 51 m.

Trägheitsmoment Stab (48).

Ndl. 13.0.
Max. 106.0; 12.80; red. 9.60.
Wdp. 44.0; 5.15; red. 3.86.

16	0.45	0.20	0.34	36.66
18	0.65	0.25	0.49	36.51
20	0.90	0.30	0.68	36.32
22	1.20	0.30	0.90	36.10
24	1.50	0.35	1.13	35.87
26	1.85	0.35	1.39	35.61
28	2.20	0.40	1.65	35.35
30	2.60	0.45	1.95	35.05
32	3.05	0.45	2.29	34.71
34	3.50	0.45	2.63	34.37
36	3.95	0.45	2.96	34.04
38	4.40	0.50	3.30	33.70
40	4.90	0.50	3.68	33.32
42	5.40	0.50	4.05	32.95
44	5.90	0.45	4.43	32.57
46	6.35	0.40	4.76	32.24
48	6.75	0.40	5.06	31.94
50	7.15	0.40	5.36	31.64
52	7.55	0.35	5.66	31.34
54	7.90	0.40	5.93	31.07
56	8.30		6.23	30.77

Ndl. 12.0.
Max. 103.0; 11.60; red. 8.70.
Wdp. 41.0; 3.55; red. 2.66.

24	0.65	0.25	0.49	36.51
26	0.90	0.30	0.68	36.32
28	1.20	0.30	0.90	36.10
30	1.50	0.30	1.13	35.87
32	1.80	0.35	1.35	35.65
34	2.15	0.35	1.61	35.39
36	2.50	0.40	1.88	35.12
38	2.90	0.40	2.18	34.82
40	3.30	0.50	2.48	34.52
42	3.80	0.45	2.85	34.15
44	4.25	0.45	3.19	33.81
46	4.70	0.45	3.53	33.47
48	5.15	0.45	3.86	33.14
50	5.60	0.40	4.20	32.80

52	6.00	0.40	4.50	32.50
54	6.40	0.40	4.80	32.20
56	6.75	0.35	5.06	31.94
58	7.10	0.35	5.33	31.67
60	7.45	0.35	5.59	31.41
62	7.80	0.35	5.85	31.15
64	8.15	0.35	6.11	30.89
66	8.50	0.35	6.38	30.62

Ndl. 11.5.
Max. 102.0; 10.70; red. 8.03.
Wdp. 42.0; 4.20; red. 3.15.

18	0.25	0.20	0.19	36.81
20	0.45	0.25	0.34	36.66
22	0.70	0.25	0.53	36.47
24	0.95	0.25	0.71	36.29
26	1.20	0.30	0.90	36.10
28	1.50	0.30	1.13	35.87
30	1.80	0.40	1.35	35.65
32	2.20	0.40	1.65	35.35
34	2.60	0.40	1.95	35.05
36	3.00	0.40	2.25	34.75
38	3.40	0.40	2.55	34.45
40	3.80	0.40	2.85	34.15
42	4.20	0.40	3.15	33.85
44	4.60	0.40	3.45	33.55
46	5.00	0.40	3.75	33.25
48	5.40	0.40	4.05	32.95
50	5.80	0.40	4.35	32.65
52	6.20	0.40	4.65	32.35
54	6.60	0.35	4.95	32.05
56	6.95	0.35	5.21	31.79
58	7.30		5.48	31.52

Ndl. 11.5.
Max. 103.0; 11.05; red. 8.29.
Wdp. 40.0; 4.05; red. 3.04.

18	0.25	0.25	0.19	36.81
20	0.50	0.25	0.38	36.62
22	0.75	0.25	0.56	36.44
24	1.00	0.30	0.75	36.25
26	1.30	0.30	0.98	36.02
28	1.60	0.30	1.20	35.80
30	1.90	0.40	1.43	35.57
32	2.30	0.40	1.73	35.27
34	2.70	0.45	2.03	34.97
36	3.15	0.45	2.36	34.64
38	3.60	0.45	2.70	34.30
40	4.05	0.40	3.04	33.96
42	4.45	0.40	3.34	33.66
44	4.85	0.45	3.64	33.36
46	5.30	0.45	3.98	33.02
48	5.75	0.40	4.31	32.69
50	6.15	0.35	4.61	32.39
52	6.50	0.35	4.88	32.12
54	6.85	0.35	5.14	31.86

Digitized by Google

56	7.20	0.35	5.40	31.60
58	7.55	0.35	5.66	31.34
60	7.85	0.30	5.89	31.11
62	8.20	0.35	6.15	30.85
64	8.50	0.30	6.38	30.62
66	8.80	0.30	6.60	30.40
68	9.05	0.25	6.79	30.21
70	9.25	0.20	6.94	30.06

Ndl. 12.0.
Max. 101.5; 11.35; red. 8.51.
Wdp. 41.0; 3.55; red. 2.66.

22	0.30	0.15	0.23	36.77
24	0.45	0.25	0.34	36.66
26	0.70	0.30	0.53	36.47
28	1.00	0.30	0.75	36.25
30	1.30	0.35	0.98	36.02
32	1.65	0.35	1.24	35.76
34	2.00	0.40	1.50	35.50
36	2.40	0.45	1.80	35.20
38	2.85	0.45	2.14	34.86
40	3.30	0.50	2.48	34.52
42	3.80	0.45	2.85	34.15
44	4.25	0.40	3.19	33.81
46	4.65	0.45	3.49	33.51
48	5.10	0.45	3.83	33.17
50	5.55	0.45	4.16	32.84
52	6.00	0.40	4.50	32.50
54	6.40	0.40	4.80	32.20
56	6.80	0.35	5.10	31.90
58	7.15	0.30	5.36	31.64
60	7.45	0.35	5.59	31.41
62	7.80	0.35	5.85	31.15
64	8.15	0.30	6.11	30.89
66	8.45	0.30	6.34	30.66
68	8.75	0.25	6.56	30.44
70	9.00	0.30	6.75	30.25
72	9.30	0.25	6.98	30.02
74	9.55		7.16	29.84

Ndl. 12.0.
Max. 103.0; 12.25; red. 9.19.
Wdp. 41.0; 4.85; red. 3.64.

20	0.70	0.30	0.53	36.47
22	1.00	0.30	0.75	36.25
24	1.30	0.30	0.98	36.02
26	1.60	0.35	1.20	35.80
28	1.95	0.40	1.46	35.54
30	2.35	0.45	1.76	35.24
32	2.80	0.45	2.10	34.90
34	3.25	0.45	2.44	34.56
36	3.70	0.45	2.78	34.22
38	4.15	0.45	3.11	33.89
40	4.60	0.50	2.45	33.55
42	5.10	0.45	3.83	33.17
44	5.55	0.45	4.16	32.84

46	6.00	0.45	4.50	32.50
48	6.40	0.40	4.80	32 20
50	6.80	0.40	5.10	31.90
52	7.20	0.40	5.40	31.60
54	7.60	0.40	5.70	31.30
56	7.95	0.35	5.96	31.04
58	8.30	0.35	6.23	30.77
60	8.65	0.35	6.49	30.51
62	9.00	0.35	6.75	30.25
64	9.30	0.30	6.98	30.02
66	9.60	0.30	7.20	29.80
68	9.85	0.25	7.39	29.61
70	10.10	0.25	7.58	29.42

Ndl. 11.5.
Max. 103.0; 11.75; red. 8.81.
Wdp. 40.0; 4.55; red. 3.41.

20	0.95	0.15	0.71	36.28
22	1.10	0.30	0.83	36.17
24	1.40	0.30	1.05	35.95
26	1.70	0.35	1.28	35.72
28	2.05	0.35	1.54	35.46
30	2.40	0.45	1.80	35.20
32	2.85	0.40	2.14	34.86
34	3.25	0.45	2.44	34.56
36	3.70	0.45	2.78	34.22
38	4.15	0.40	3.11	33.89
40	4.55	0.45	3.41	33.59
42	5.00	0.45	3.75	33.25
44	5.45	0.45	4.09	32.91
46	5.90	0.40	4.43	32.57
48	6.30	0.45	4.73	32.27
50	6.75	0.45	5.06	31.94
52	7.20	0.30	5.40	31.60
54	7.50	0.30	5.63	31.37
56	7.80	0.35	5.85	31.15
58	8.15	0.30	6.11	30.89
60	8.45	0.30	6.34	30.66
62	8.75		6.56	30.44

Ndl. 11.0;
Max. 100.5; 10.30; red. 7.73.
Wdp. 39.0; 3.60; red. 2.70.

20	0.50	0.20	0.38	36.62
22	0.70	0.30	0.53	36.47
24	1.00	0.30	0.75	36.25
26	1.30	0.25	0.98	36.02
28	1.55	0.30	1.16	35.84
30	1.85	0.30	1.39	35.61
32	2.15	0.45	1.61	35.39
34	2.60	0.40	1.95	35.05
36	3.00	0.40	2.25	34.75
38	3.40	0.40	2.55	34.45
40	3.80	0.40	2.85	34.15
42	4.20	0.40	3.15	33.85
44	4.60	0.40	3.45	33.55

46	5.00	0.40	3.75	33.25
48	5.35	0.35	4.01	32.99
50	5.70	0.35	4.29	32.71
52	6.10	0.40	4.58	32.42
54	6.40	0.30	4.80	32.20
56	6.70	0.30	5.03	31.97
58	7.00	0.30	5.25	31.75
60	7.30	0.30	5.48	31.52

Ndl. 11.0.
Max. 99.5; 11.40; red. 8.55.
Wdp. 37.0; 3.85; red. 2.89.

20	0.75	0.25	0.56	36.44
22	1.00	0.25	0.75	36.25
24	1.25	0.30	0.94	36.06
26	1.55	0.35	1.16	35.84
28	1.90	0.40	1.43	35.57
30	2.30	0.40	1.73	35.27
32	2.70	0.45	2.03	34.97
34	3.15	0.45	2.36	34.64
36	3.60	0.50	2.70	34.30
38	4.10	0.45	3.08	33.92
40	4.55	0 45	3.41	33.59
42	5.00	0.45	3.75	33.25
44	5.45	0.45	4.09	32.91
46	5.90	0.45	4.43	32.57
48	6.35	0.40	4.76	32.24
50	6.75	0.40	5.06	31.94
52	7.15	0.35	5.36	31.64
54	7.50	0.35	5.63	31.37
56	7.85	0.35	5.89	31.11
58	8.20	0.30	6.15	30.85
60	8.50		6.38	30.62

Ndl. 11.0.
Max. 99.0; 9.95; red. 7.46.
Wdp. 44.0; 4.60; red. 3.45 (!)

20	0.50	0.25	0.38	36.62
22	0.75	0.25	0.56	36.44
24	1.00	0.30	0.75	36.25
26	1.30	0.30	0.98	36.02
28	1.60	0.30	1.20	35.80
30	1.90	0.30	1.43	35.57
32	2.20	0.35	1.65	35.35
34	2.55	0.35	1.91	35.09
36	2.90	0.45	2.18	34.82
38	3.35	0.35	2.51	34.49
40	3.70	0.40	2.78	34.22
42	4.10	0.50	3.08	33.92
44	4.60	0.50	3.45	33.55
46	5.10	0.45	3.83	33.17
48	5.55	0.35	4.16	32.84
50	5.90	0.40	4.43	32.57
52	6.30	0.30	4.73	32.27
54	6.60	0.30	4.95	32.05
56	6.90	0.30	5.18	31.82
58	7.20	0.30	5.40	31.60
60	7.50		5.63	31.37

Digitized by Google

Ndl. 11.5.
Max. 102.0; 11.15; red. 8.36.
Wdp. 38.0; 3.90; red. 2.93.

20	0.75	0.30	0.56	36.44
22	1.05	0.30	0.79	36.21
24	1.35	0.25	1.01	35.99
26	1.60	0.30	1.20	35.80
28	1.90	0.35	1.43	35.57
30	2.25	0.35	1.69	35.31
32	2.60	0.40	1.95	35.05
34	3.00	0.45	2.25	34.75
36	3.45	0.45	2.59	34.41
38	3.90	0.45	2.93	34.07
40	4.35	0.45	3.26	33.74
42	4.80	0.40	3.60	33.40
44	5.20	0.35	3.90	33.10
46	5.55	0.35	4.16	32.84
48	5.90	0.45	4.43	32.57
50	6.35	0.35	4.76	32.24
52	6.70	0.40	5.03	31.97
54	7.10	0.30	5.33	31.67
56	7.40	0.35	5.55	31.45
58	7.75	0.35	5.81	31.19
60	8.10	0.30	6.08	30.92
62	8.40		6.30	30.70

Ndl. 11.5.
Max. 96.5; 10.25; red. 7.69.
Wdp. 39.0; 3.95; red. 2.96.

20	0.65	0.20	0.49	36.51
22	0.85	0.25	0.64	36.36
24	1.10	0.35	0.83	36.17
26	1.45	0.35	1.09	35.91
28	1.80	0.35	1.35	35.65
30	2.15	0.40	1.61	35.39
32	2.55	0.40	1.91	35.09
34	2.95	0.40	2.21	34.79
36	3.35	0.40	2.51	34.49
38	3.75	0.45	2.81	34.19
40	4.20	0.40	3.15	33.85
42	4.60	0.40	3.45	33.55
44	5.00	0.40	3.75	33.25
46	5.40	0.40	4.05	32.95
48	5.80	0.40	4.35	32.65
50	6.20	0.35	4.65	33.35
52	6.55	0.30	4.91	32.09
54	6.85		5.14	31.86

Ndl. 11.5.
Max. 98.5; 10.60; red. 7.95.
Wdp. 39.0; 3.95; red. 2.96.

20	0.60	0.25	0.45	36.55
22	0.85	0.25	0.64	36.36
24	1.10	0.30	0.83	36.17
26	1.40	0.35	1.05	35.95
28	1.75	0.40	1.31	35.69
30	2.15	0.35	1.61	35.39
32	2.50	0.35	1.88	35.12
34	2.90	0.40	2.18	34.82
36	3.35	0.45	2.51	34.49
38	3.75	0.40	2.81	34.19
40	4.20	0.45	3.15	33.85
42	4.60	0.40	3.45	33.55
44	5.05	0.45	3.79	33.21
46	5.50	0.45	4.13	32.87
48	5.85	0.35	4.39	32.61
50	6.25	0.40	4.69	32.31
52	6.60	0.35	4.95	32.05

Ndl. 11.0.
Max. 75.0; 9.15; red. 6.86.
Wdp. 34.0; 3.80; red. 2.85.

16	0.40	0.25	0.30	36.70
18	0.65	0.25	0.49	36.51
20	0.90	0.30	0.68	36.32
22	1.20	0.35	0.90	36.10
24	1.55	0.40	1.16	35.84
26	1.95	0.45	1.46	35.54
28	2.40	0.45	1.80	35.20
30	2.85	0.45	2.14	34.86
32	3.30	0.50	2.48	34.52
34	3.80	0.50	2.85	34.15
36	4.30	0.40	3.23	33.77
38	4.70	0.45	3.53	33.47
40	5.15	0.45	3.86	33.14
42	5.60	0.40	4.20	32.80
44	6.00	0.40	4.50	32.50
46	6.40	0.35	4.80	32.20
48	6.75	0.40	5.06	31.94
50	7.15	0.35	5.36	31.64
52	7.50	0.25	5.63	31.37
54	7.75	0.25	5.81	31.19
56	8.00	0.20	6.00	31.00
58	8.20	0.25	6.15	30.85
60	8.45		6.34	30.66

Ndl. 11.0.
Max. 75.0; 8.75; red. 6.56.
Wdp. 34.0; 3.65; red. 2.74.

16	0.35	0.20	0.26	36.74
18	0.55	0.25	0.41	36.59
20	0.80	0.35	0.60	36.40
22	1.15	0.40	0.86	36.14
24	1.55	0.35	1.16	35.84
26	1.90	0.40	1.43	35.57
28	2.30	0.45	1.73	35.27
30	2.75	0.45	2.06	34.94
32	3.20	0.45	2.40	34.60
34	3.65	0.45	2.74	34.26
36	4.10	0.45	3.08	33.92
38	4.55	0.45	3.41	33.59
40	5.00	0.40	3.75	33.25
42	5.40	0.40	4.05	32.95
44	5.80	0.40	4.35	32.65
46	6.20	0.40	4.65	32.35
48	6.55	0.35	4.91	32.09
50	6.85	0.30	5.14	31.86

Ndl. 11.5.
Max. 75.0; 10.30; red. 7.73.
Wdp. 34.0; 4.65; red. 3.49.

14	0.50	0.25	0.38	36.62
16	0.75	0.30	0.56	36.44
18	1.05	0.40	0.79	36.21
20	1.45	0.40	1.09	35.91
22	1.85	0.40	1.39	35.61
24	2.25	0.45	1.69	35.31
26	2.70	0.50	2.03	34.97
28	3.20	0.45	2.40	34.60
30	3.65	0 50	2.74	34.26
32	4.15	0.50	3.11	33.89
34	4.65	0.45	3.49	33.51
36	5.10	0.55	3.83	33.17
38	5.65	0.55	4.24	32.76
40	6.20	0.45	4.65	32.35
42	6.65	0.40	4.99	32.01
44	7.05		5.29	31.71

Beginn 3 h 2 m.
Schluss 3 h 14 m.

Minimalmoment.

Ndl.	Max.-Absc.	Max.-Ord.	Max.-Ord. red.
8.0	33.5	3.85	2.89
7.0	33.5	4.15	3.11
6.5	35.5	4.45	3.34
7.0	34.0	3.85	2.89
6.5	34.5	3.85	2.89
6.5	33.5	3.80	2.85
6.5	33.0	3.70	2.78
7.0	33.5	3.65	2.74
6.5	32.5	3.70	2.78
6.5	27.5	3.40	2.55
?	27.0	3.40	2.55

Beginn 3 h 20 m.
Schluss 4 h 41 m.

Maximalmoment.

Ndl.	Hub	Hub red.
8.5	0.65	0.49
8.0	0.85	0.64
7.0	0.60	0.45
6.5	0.85	0.64
6.5	0.85	0.64
7.0	0.90	0.68
6.5	0.95	0.71
6.5	0.60	0.45
6.0	0.70	0.53

Digitized by Google

Ndl.	Hub	Hub red.
6.0	0.60	0.45
5.5	0.55	0.41
5.5	0.60	0.45
6.0	0.70	0.53
6.0	0.60	0.45
5.5	0.70	0.53
5.0	0.70	0.53
5.0	0.60	0.45
4.5	0.60	0.45
4.5	0.60	0.45
4.5	0.50	0.38
4.0	0.50	0.38
4.0	0.50	0.38
4.5	0.50	0.38
4.0	0.50	0.38
4.5	0.45	0.34
4.5	0.45	0.34
4.0	0.45	0.34
4.0	0.45	0.34

Versuch LXVII. 26/XI. 88.

Anf.-Sp. 21.88.
Muskellänge 35 mm.
Muskelmasse 3.061 g.

Beginn 10 h 45 m.
Schluss 11 h 13 m.

Minimalmoment.

Ndl. 8.0.
Max. 29.0; 10.90; red. 8.18.
Wdp. 9.0; 2.65; red. 1.99.

		Diff.		
5	0.25		0.19	34.81
6	0.70	0.45	0.53	34.47
7	1.30	0.60	0.98	34.02
8	1.95	0.65	1.46	33.54
9	2.65	0.70	1.99	33.01
10	3.35	0.70	2.51	32.49
11	4.00	0.65	3.00	32.00
12	4.65	0.65	3.49	31.51
13	5.30	0.65	3.98	31.02
14	5.85	0.55	4.39	30.61
15	6.40	0.55	4.80	30.20

Ndl. 9.0.
Max. 30.0; 10.60; red. 7.95.
Wdp. 9.5; 3.35; red. 2.51.

		Diff.		
5	0.50		0.38	34.62
6	1.05	0.55	0.79	34.21
7	1.60	0.55	1.20	33.80
8	2.30	0.70	1.73	33.27
9	3.00	0.70	2.25	32.75
10	3.65	0.65	2.74	32.26
		0.65		

		Diff.		
11	4.30	0.65	3.23	31.77
12	5.00	0.70	3.75	31.25
13	5.55	0.55	4.16	30.84
14	6.05	0.50	4.54	30.46
15	6.60	0.55	4.95	30.05

Ndl. 8.5.
Max. 31.0; 11.70; red. 8.78.
Wdp. 8.0; 2.05; red. 1.54.

		Diff.		
6	0.70		0.53	34.47
7	1.35	0.65	1.01	33.99
8	2.05	0.70	1.54	33.46
9	2.75	0.70	2.06	32.94
10	3.40	0.65	2.55	32.45
11	4.05	0.65	3.04	31.96
12	4.70	0.65	3.53	31.47
13	5.30	0.60	3.98	31.02
14	5.85	0.55	4.39	30.61
15	6.40	0.55	4.80	30.20

Ndl. 8.5.
Max. 30.0; 11.65; red. 8.73.
Wdp. 9.0; 3.30; red. 2.47.

		Diff.		
5	0.65		0.49	34.51
6	1.25	0.60	0.94	34.06
7	1.90	0.65	1.43	33.57
8	2.60	0.70	1.95	33.05
9	3.30	0.70	2.48	32.52
10	4.00	0.70	3.00	32.00
11	4.70	0.70	3.53	31.47
12	5.35	0.65	4.01	30.99
13	5.95	0.60	4.46	30.54
14	6.50	0.55	4.88	30.12

Ndl. 8.5.
Max. 30.0; 11.55; red. 8.66.
Wdp. 9.0; 3.30; red. 2.47.

		Diff.		
5	0.65		0.49	34.51
6	1.20	0.55	0.90	34.10
7	1.90	0.70	1.43	33.57
8	2.60	0.70	1.95	33.05
9	3.30	0.70	2.48	32.52
10	4.00	0.70	3.00	32.00
11	4.70	0.70	3.53	31.47
12	5.40	0.70	4.05	30.95
13	5.95	0.55	4.46	30.54
14	6.45	0.50	4.84	30.16

Ndl. 8.0.
Max. 30.5; 11.55; red. 8.66.
Wdp. 9.0; 3.00; red. 2.25.

		Diff.		
5	0.45		0.34	34.66
6	1.05	0.60	0.79	34.21
7	1.65	0.60	1.24	33.76
8	2.30	0.65	1.73	33.27
9	3.00	0.70	2.25	32.75
		0.70		

		Diff.		
10	3.70	0.70	2.78	32.22
11	4.30	0.60	3.23	31.77
12	5.00	0.70	3.75	31.25
13	5.55	0.55	4.16	30.84

Ndl. 8.0.
Max. 30.0; 10.55; red. 7.92.
Wdp. 9.5; 2.35; red. 1.77.

		Diff.		
6	0.35		0.26	34.74
7	0.70	0.35	0.53	34.47
8	1.30	0.60	0.98	34.02
9	1.95	0.65	1.46	33.54
10	2.70	0.75	2.03	32.97
11	3.35	0.65	2.51	32.49
12	4.00	0.65	3.00	32.00
13	4.65	0.65	3.49	31.51
14	5.30	0.65	3.98	31.02

Ndl. 8.0.
Max. 29.5; 11.50; red. 8.63.
Wdp. 9.0; 3.05; red. 2.29.

		Diff.		
5	0.40		0.30	34.70
6	0.95	0.55	0.71	34.29
7	1.65	0.70	1.24	33.76
8	2.35	0.70	1.76	33.24
9	3.05	0.70	2.29	32.71
10	3.75	0.70	2.81	32.19
11	4.45	0.70	3.34	31.66
12	5.15	0.70	3.86	31.14
13	5.80	0.65	4.35	30.65

Ndl. 8.0.
Max. 29.0; 11.05; red. 8.29.
Wdp. 9.0; 3.30; red. 2.48.

		Diff.		
5	0.75		0.56	34.44
6	1.30	0.55	0.98	34.02
7	1.95	0.65	1.46	33.54
8	2.60	0.65	1.95	33.05
9	3.30	0.70	2.48	32.52
10	4.00	0.70	3.00	32.00
11	4.65	0.65	3.49	31.51
12	5.30	0.65	3.98	31.02

Ndl. 8.0.
Max. 29.5; 11.50; red. 8.63.
Wdp. 9.0; 3.40; red. 2.55.

		Diff.		
5	0.75		0.56	34.44
6	1.40	0.65	1.05	33.95
7	2.05	0.65	1.54	33.46
8	2.70	0.65	2.03	32.97
9	3.40	0.70	2.55	32.45
10	4.10	0.70	3.08	31.92
11	4.75	0.65	3.56	31.44
12	5.40	0.65	4.05	30.95
13	6.00	0.60	4.50	30.50

Digitized by Google

Ndl. 7.5.
Max. 29.0; 11.40; red. 8.55.
Wdp. 9.0; 2.90; red. 2.18.

5	0.40	0.55	0.30	34.70
6	0.95	0.65	0.71	34.29
7	1.60	0.60	1.20	33.80
8	2.20	0.70	1.65	33.35
9	2.90	0.70	2.18	32.82
10	3.60	0.65	2.70	32.30
11	4.25	0.65	3.19	31.81
12	4.90	0.60	3.68	31.32
13	5.50		4.13	30.87

Ndl. 7.5.
Max. 29.5; 10.10; red. 7.58.
Wdp. 9.5; 2.55; red. 1.91.

6	0.30	0.40	0.23	34.77
7	0.70	0.70	0.53	34.47
8	1.40	0.80	1.05	33.95
9	2.20	0.65	1.65	33.35
10	2.85	0.65	2.14	32.86
11	3.50	0.70	2.63	32.37
12	4.20	0.60	3.15	31.85
13	4.80		3.60	31.40

Ndl. 7.0.
Max. 29.0; 10.15; red. 7.61.
Wdp. 9.5; 2.45; red. 1.84.

6	0.35	0.45	0.26	34.74
7	0.80	0.65	0.60	34.40
8	1.45	0.65	1.09	33.91
9	2.10	0.70	1.58	33.42
10	2.80	0.65	2.10	32.90
11	3.45	0.65	2.59	32.41
12	4.10	0.60	3.08	31.92
13	4.70		3.53	31.47

Ndl. 7.5.
Max. 27.5; 9.95; red. 7.46.
Wdp. 9.0; 2.10; red. 1.58.

6	0.20	0.50	0.15	34.85
7	0.70	0.70	0.53	34.47
8	1.40	0.70	1.05	33.95
9	2.10	0.65	1.58	33.42
10	2.75	0.70	2.06	32.94
11	3.45	0.65	2.59	32.41
12	4.10	0.65	3.08	31.92
13	4.75		3.56	31.44

Ndl. 7.0.
Max. 26.5; 10.10; red. 7.58.
Wdp. 8.5; 3.00; red. 2.25.

5	0.30	0.65	0.23	34.77
6	0.95	0.70	0.71	34.29
7	1.65	0.90	1.24	33.76
8	2.55	0.90	1.91	33.09
9	3.45	0.90	2.59	32.41
10	4.35	0.65	3.26	31.74
11	5.00		3.75	31.25

Ndl. 6.5.
Max. 25.0; 9.70; red. 7.28.
Wdp. 8.5; 2.70; red. 2.03.

6	0.70	0.70	0.53	34.47
7	1.40	0.85	1.05	33.95
8	2.25	0.85	1.69	33.31
9	3.10	0.85	2.33	32.67
10	3.95	0.75	2.96	32.04
11	4.70	0.65	3.53	31.47
12	5.35		4.01	30.99

Ndl. 6.5.
Hub 24.0; 9.65; red. 7.23.
Wdp. 8.5; 3.40; red. 2.55.

4	0.20	0.50	0.15	34.85
5	0.70	0.80	0.53	34.47
6	1.50	0.70	1.12	33.88
7	2.20	0.75	1.65	33.35
8	2.95	0.85	2.22	32.78
9	3.80	0.80	2.85	32.15
10	4.60	0.75	3.45	31.55
11	5.35		4.02	30.98

Ndl. 6.5.
Max. 24.0; 9.60; red. 7.20.
Wdp. ?.

Beginn 11 h 26 m.
Schluss 11 h 50 m.

Anf.-Sp. 66.42.

Ndl.	Max.-Absc.	Max.-Ord	Max.-Ord. red.
7.5	30.0	7.90	5.93
7.5	30.5	7.75	5.81
7.5	32.0	7.90	5.93
7.0	29.5	8.05	6.04
7.5	30.0	8.35	6.26
7.0	27.5	8.60	6.45
6.5	29.5	7.80	5.85
7.0	30.5	7.95	5.96
7.0	29.5	8.15	6.11
7.0	29.0	7.55	5.66
7.0	28.5	7.90	5.93
7.0	30.0	7.40	5.55
7.0	29.0	7.65	5.74
7.0	28.0	7.55	5.66

Beginn 12 h 13 m.
Schluss 12 h 18 m.

Anf.-Sp. 165.65.

5.5	27.5	5.70	4.28
6.0	27.5	5.10	3.83
6.0	28.0	4.95	3.71
6.0	29.5	4.80	3.60

Versuch LXXII. 3/XII. 88

Anf.-Sp. 66.42. Muskellänge 43 mm. Muskelmasse 5.961 g.

Beginn 11 h 22 m. Schluss 11 h 52 m.

Trägheitsmoment Stab (28).

Ndl.	Max.-Absc.	Max.-Ord.	Max.-Ord. red.	Wdp.-Absc.	Wdp.-Ord.	Wdp.-Ord. red.
21.5	106.5	39.35	29.51	28.5	10.95	8.21
17.5	105.5	39.45	29.59	28.0	10.60	7.95
17.5	110.0	39.05	29.29	29.5	10.70	8.03
14.0	102.5	33.05	24.79	28.5	9.25	6.94
15.5	104.5	38.05	28.54	27.5	10.30	7.73
14.5	103.5	37.90	28.43	27.5	10.40	7.80
14.5	106.0	37.05	27.79	26.0	8.85	6.64
15.5	102.0	37.05	27.79	24.5	8.75	6.56
14.0	101.5	36.50	27.38	26.0	9.55	7.16
15.5	102.5	36.30	27.23	26.0	9.30	6.98
14.5	102.5	35.45	26.59	27.0	9.70	7.28

Digitized by Google

Ndl.	Max.-Absc.	Max.-Ord.	Max.-Ord. red.	Wdp.-Absc.	Wdp.-Ord.	Wdp.-Ord. red.
15.0	98.5	35.75	26.81	26.0	10.05	7.54
14.5	95.0	34.60	25.95	26.0	10.15	7.61
13.0	97.0	35.05	26.29	26.0	9.90	7.43
13.0	90.5	31.00	23.25	25.5	8.85	6.64
12.0	94.0	31.00	23.25	27.0	8.25	6.19
13.5	95.0	34.30	25.73	25.0	9.35	7.01
12.5	96.0	34.70	26.03	25.0	9.00	6.75
12.0	91.5	33.65	25.24	24.5	9.30	6.98
13.5	92.5	32.80	24.60	24.0	8.90	6.68
13.5	91.5	32.05	24.04	24.5	9.00	6.75
12.0	95.0	32.75	24.56	25.5	9.20	6.90
13.0	86.0	32.40	24.30	22.5	8.75	6.56
12.0	76.5	31.25	23.44	20.5	8.60	6.45

Beginn 12 h 10 m. Schluss 12 h 30 m.

Trägheitsmoment Stab (48).

16.0	251.5	50.90	38.18	46.0	10.80	8.10
15.0	251.0	50.05	37.54	45.5	10.00	7.50
14.0	251.0	50.50	37.88	45.0	10.20	7.65
12.0	244.0	54.05	40.54	44.0	10.70	8.03
13.0	249.0	56.05	42.04	46.0	10.45	7.84
13.0	234.0	47.00	35.25	42.0	8.60	6.45
12.0	235.0	45.45	34.09	42.5	8.00	6.00
12.0	237.0	50.40	37.80	42.0	8.90	6.68
11.5	234.0	49.25	36.94	43.0	9.00	6.75
11.0	233.0	47.85	35.89	41.0	8.75	6.56
11.5	233.0	47.60	35.70	41.0	9.60	7.20
11.0	233.0	49.30	36.98	42.0	9.00	6.75
12.0	237.0	45.05	33.79	42.0	9.65	7.24
12.0	237.0	42.30	31.73	42.0	7.70	5.78
12.0	234.0	41.50	31.13	41.0	8.60	6.45
11.0	237.0	41.55	31.16	41.0	8.25	6.19

Beginn 3 h 13 m.
Schluss 3 h 27 m.

Maximalmoment.

Ndl.	Hub	Hub red.
14.0	3.00	2.25
11.0	2.65	1.99
9.0	3.10	2.33
8.0	2.80	2.10
8.0	3.25	2.44
8.0	3.05	2.29
8.0	3.20	2.40
8.0	3.45	2.59
8.0	3.60	2.70
8.0	3.60	2.70
7.5	3.40	2.55
7.0	3.05	2.29
7.0	3.20	2.40
7.0	2.75	2.06
7.5	2.75	2.06
7.0	2.55	1.91
7.0	2.80	2.10

Beginn 3 h 36 m.
Schluss 4 h 7 m.

Maximalmoment.

Ndl.	Hub	Hub red.
9.0	2.15	1.61
7.5	2.35	1.76
7.0	2.35	1.76

Minimalmoment.

5.5	9.00	6.75
5.5	9.00	6.75
5.5	9.10	6.83

Maximalmoment.

7.0	2.35	1.76
7.0	2.25	1.69
6.5	2.30	1.73

Minimalmoment.

Ndl.	Hub	Hub red.
5.5	8.80	6.60
5.5	8.80	6.60
5.5	8.70	6.53

Maximalmoment.

6.5	1.80	1.35
6.5	2.05	1.54
6.5	1.95	1.46

Minimalmoment.

5.0	8.45	6.34
5.0	8.40	6.30
5.0	8.45	6.34

Maximalmoment.

6.5	1.80	1.35
6.0	1.75	1.31
6.0	1.80	1.35

Digitized by Google

Bemerkung zu Anhang III.

Ist c_p der vorgegebene Werth des p-ten Differentialquotienten $\frac{d^p f(a+nw)}{d(a+nw)^p}$, so ergiebt sich zur Bestimmung des ihm zugehörigen Arguments für n die lineare Gleichung:

$$w^p c_p = f^{(p)}\left(a+\frac{p}{2}\right) + \left(n-\frac{p}{2}\right) f^{(p+1)}\left(a+\frac{p+1}{2}\right),$$

vorausgesetzt, dass die Anzahl der gegebenen Punkte die geringstmögliche sei, nämlich $p+2$.

Aus der obigen Gleichung geht hervor:

$$n = \frac{p}{2} + \frac{w^p c_p - f^{(p)}\left(a+\frac{p}{2}\right)}{f^{(p+1)}\left(a+\frac{p+1}{2}\right)}.$$

Insbesondere resultirt also für den Verschwindungspunkt des p-ten Differentialquotienten:

$$n = \frac{p}{2} - \frac{f^{(p)}\left(a+\frac{p}{2}\right)}{f^{(p+1)}\left(a+\frac{p+1}{2}\right)}.$$

Berichtigungen.

Seite 44, Zeile 5 von unten, ist zwischen »Ausnahme« und »eines« einzuschalten: »der Zahlen des Minimalmoments, wofür beide Methoden übereinstimmende Ergebnisse liefern, und«.
- 51 - 10 und 11 von oben, statt »getrübt« lies: »verhindert«.

Druckfehler.

- 69 - 10 von unten, statt »$-2\sigma^2 y$« lies: »$-2\sigma^3 y$«.
- 78 - 2 - - , statt »Const.« lies: »const.«.
- 81 - 10 - - , ist zwischen »Bestimmung« und »des« einzuschalten: »des Arguments«.

Digitized by Google

TAFELN.

Digitized by Google

Erklärung der Tafeln.

Tafel I.

Apparat zur Messung der Coordinaten der Muskelcurve.

a fester horizontaler Maasstab,
b beweglicher verticaler Maasstab,
c Mikrometerschraube zur Messung der Verschiebung des verticalen Maasstabs,
d Druckschraube zur Fixirung der Ausgangslage des verticalen Maasstabs.

Tafel II—VI.

Muskelcurven.

$1\frac{1}{3}$-fache Ordinatenvergrösserung.
1 mm Abscissenlänge entspricht 0.0023 sec.

Tafel II und III.

Constante Anfangsspannung (66.42 g), variables Trägheitsmoment.

Tafel II: Reihe der aufsteigenden Trägheitsmomente.
Tafel III: Reihe der absteigenden Trägheitsmomente.

Tafel IV und V.

Constantes Trägheitsmoment (Stab [18]), variable Anfangsspannung.

Tafel IV: Reihe der aufsteigenden Anfangsspannungen.
Tafel V: Reihe der absteigenden Anfangsspannungen.

Tafel VI.

Ermüdungscurven.

Constante Anfangsspannung 66.42 g.
Constantes Trägheitsmoment Stab (28).

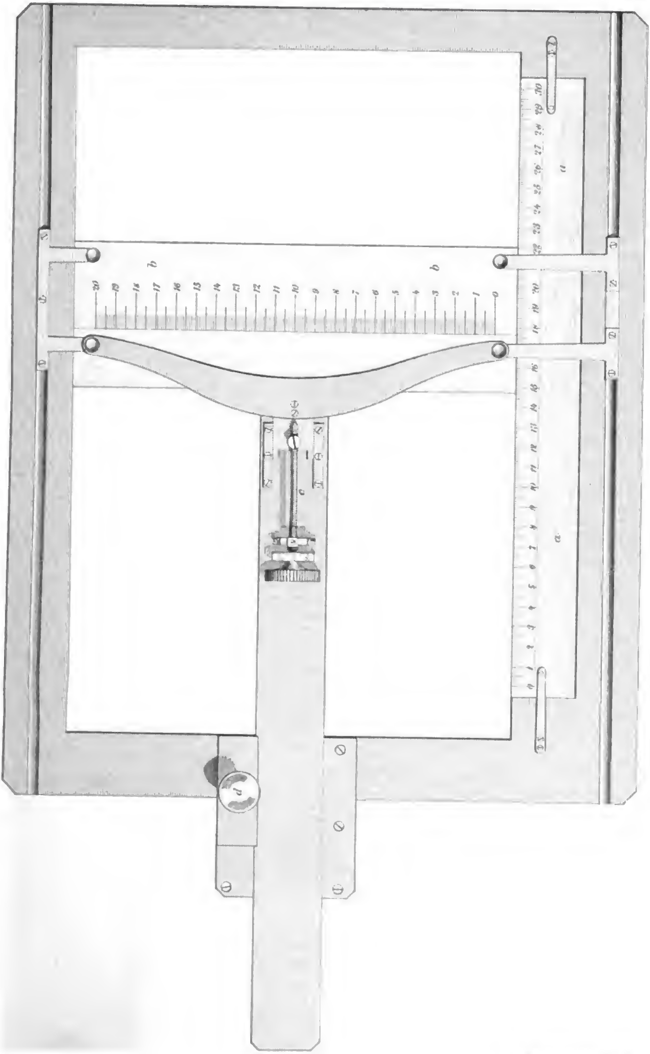
Tafel VII, VIII und IX.

Arbeit und Wärme als Funktionen des Trägheitsmoments.

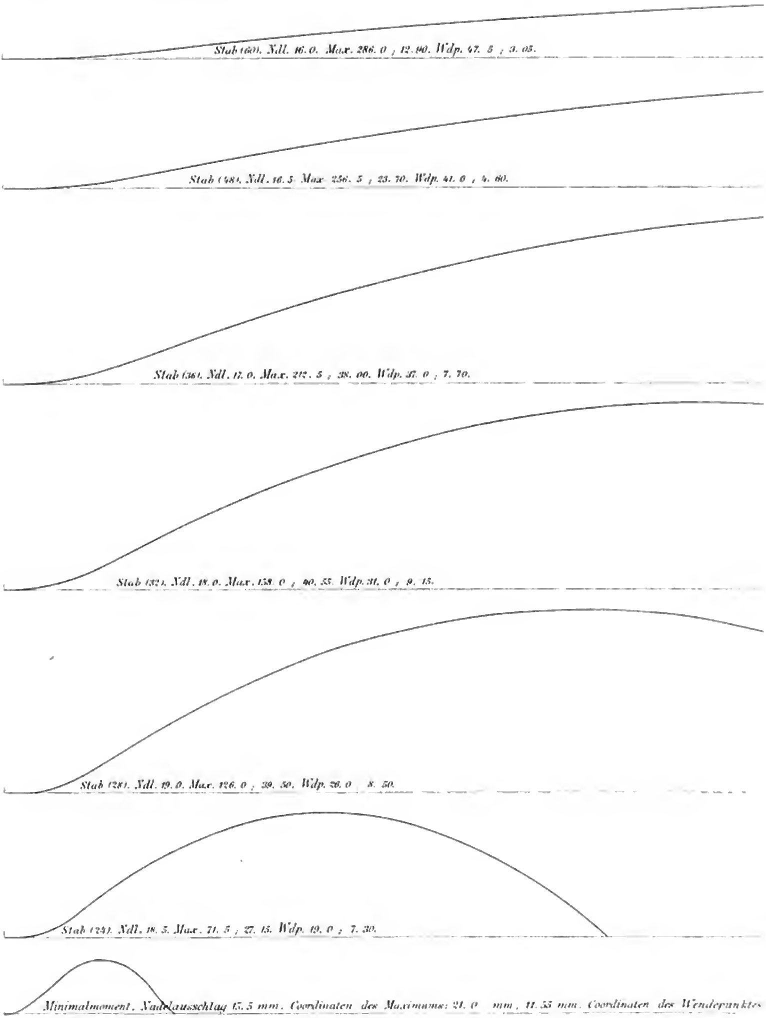
Jedem mm Abscissenlänge entspricht ein Trägheitsmoment von 668.34 cm^2g, mit Ausnahme der 4 letzten Figuren der Tafel IX, wo jedem halben mm Abscissenlänge ein Trägheitsmoment von 668.34 cm^2g entspricht.

Die Ordinaten der ausgezogenen »Arbeitscurve« sind die Hübe in wahrer Grösse, die der punktirten »Wärmecurve« die Nadelausschläge gleichfalls in wahrer Grösse.

Digitized by Google



Digitized by Google



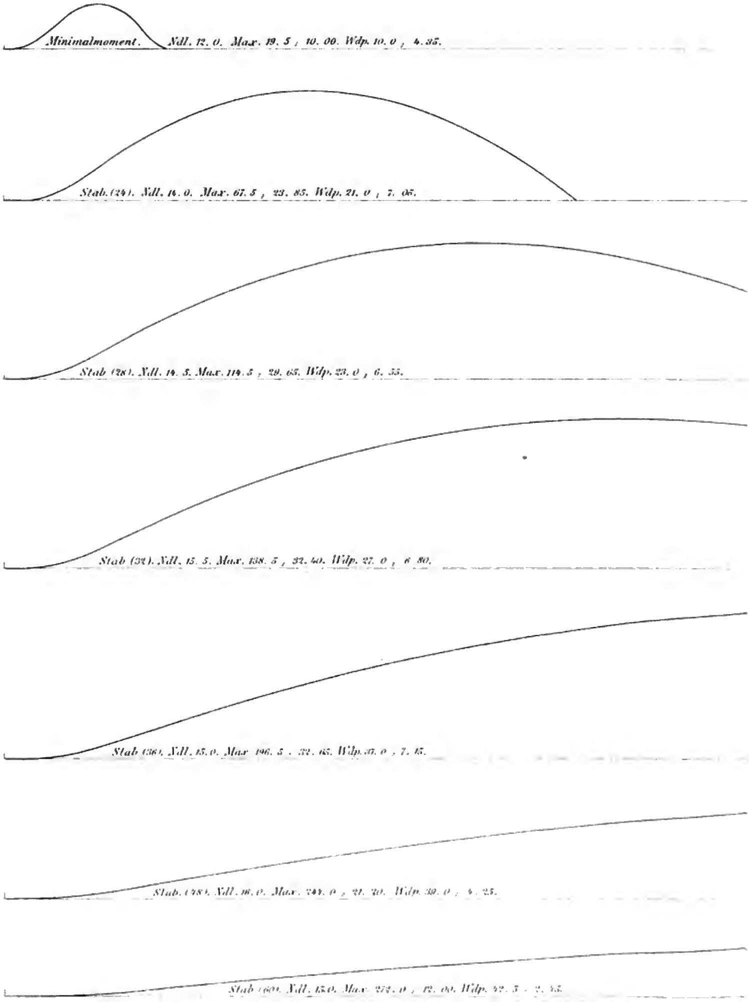
Verst.

Digitized by Google

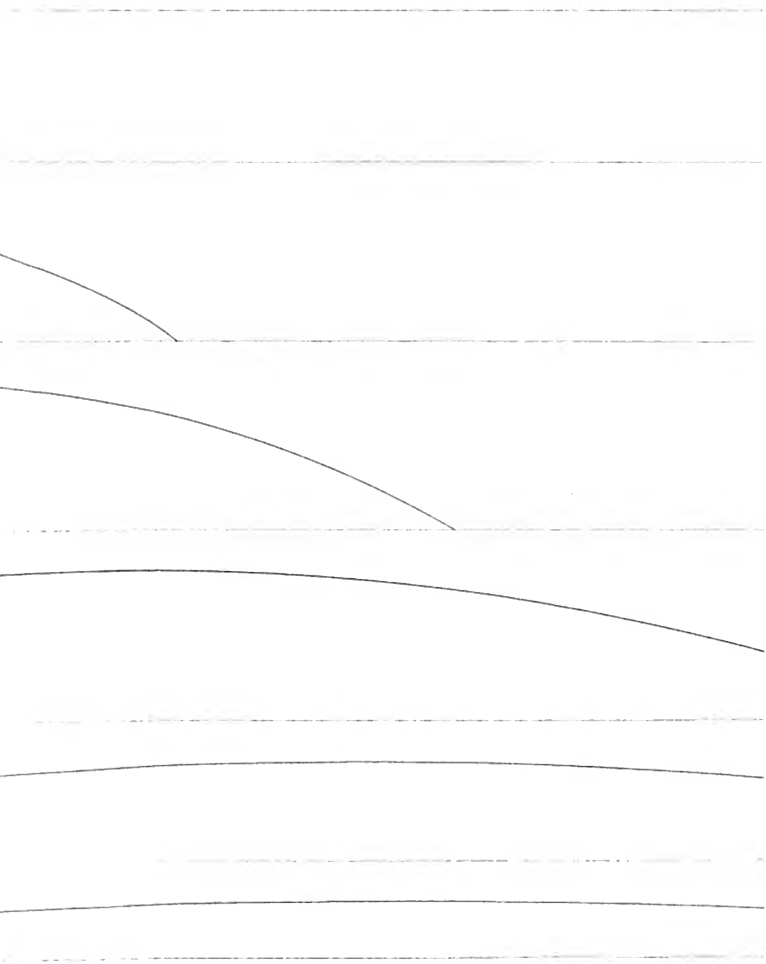
mm, 70 mm

XXVIII.

Digitized by Google

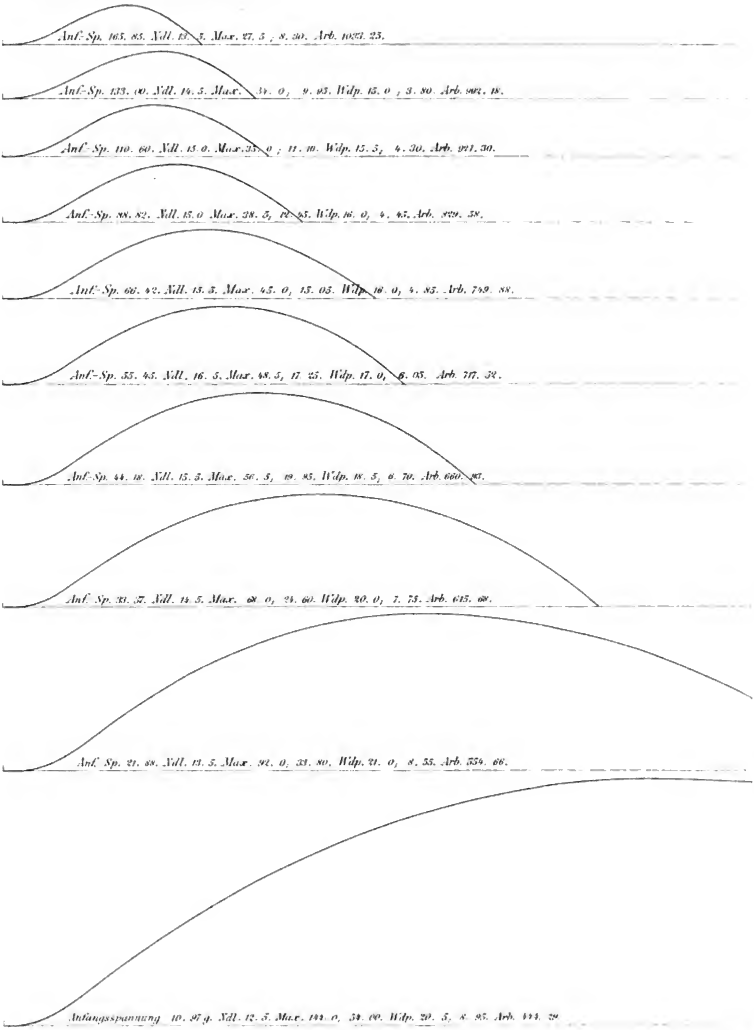


Digitized by Google

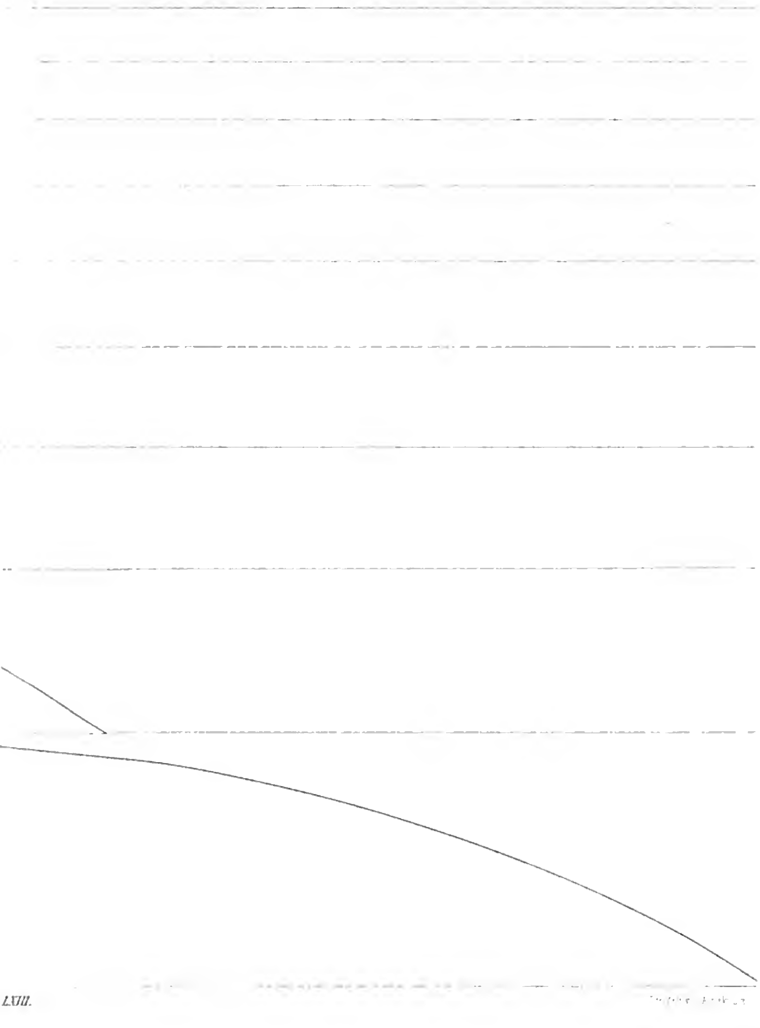


h XXVIII.

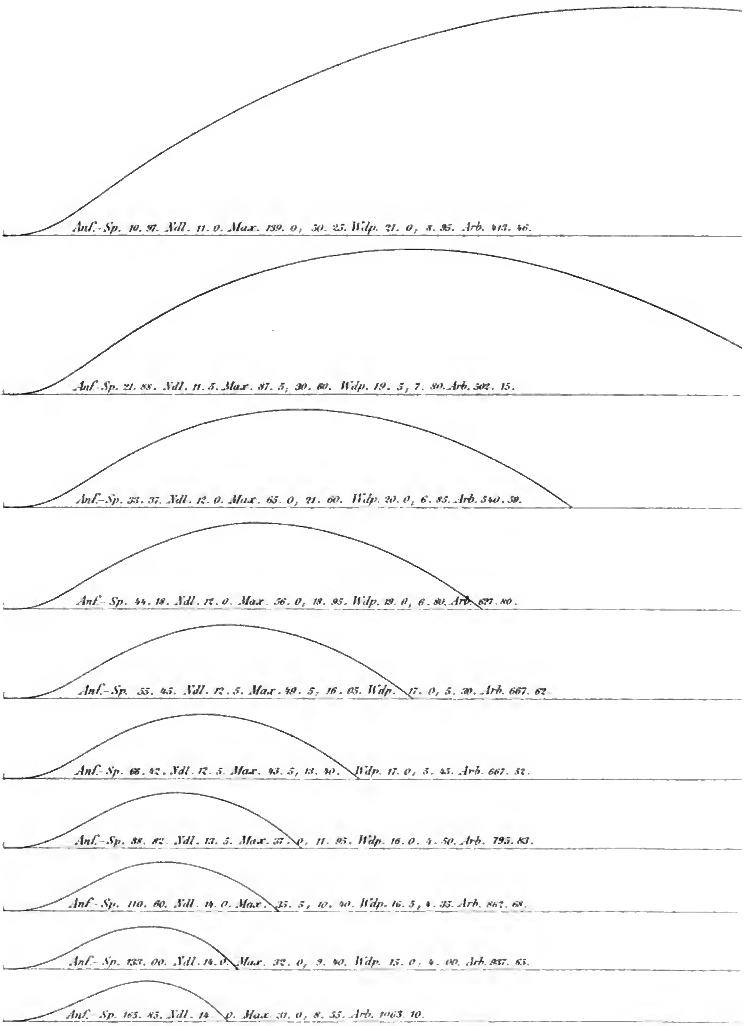
Digitized by Google


Anf.-Sp. 165. 85. Ndl. 13. 5. Max. 27. 5 ; 8. 30. Arb. 1023. 25.
Anf.-Sp. 133. 00. Ndl. 14. 5. Max. 34. 0, 9. 93. Wdp. 15. 0 , 3. 80. Arb. 902. 18.
Anf.-Sp. 110. 60. Ndl. 13. 0. Max. 35. 0 ; 11. 10. Wdp. 15. 5, 4. 30. Arb. 921. 30.
Anf.-Sp. 88. 82. Ndl. 15. 0 Max. 38. 5, 12. 85. Wdp. 16. 0, 4. 45. Arb. 829. 58.
Anf.-Sp. 66. 42. Ndl. 13. 5. Max. 45. 0, 15. 05. Wdp. 16. 0, 4. 85. Arb. 749. 88.
Anf.-Sp. 55. 45. Ndl. 16. 5. Max. 48. 5, 17. 25. Wdp. 17. 0, 6. 05. Arb. 717. 52.
Anf.-Sp. 44. 18. Ndl. 15. 5. Max. 56. 5, 19. 85. Wdp. 18. 5, 6. 70. Arb. 660. 93.
Anf. Sp. 33. 37. Ndl. 14. 5. Max. 68. 0, 24. 60. Wdp. 20. 0, 7. 75. Arb. 615. 68.
Anf. Sp. 21. 88. Ndl. 13. 5. Max. 92. 0, 33. 80. Wdp. 21. 0, 8. 55. Arb. 554. 66.
Anfangsspannung 10. 97 g. Ndl. 12. 5. Max. 144. 0, 54. 00. Wdp. 20. 5, 8. 95. Arb. 444. 29

Versu

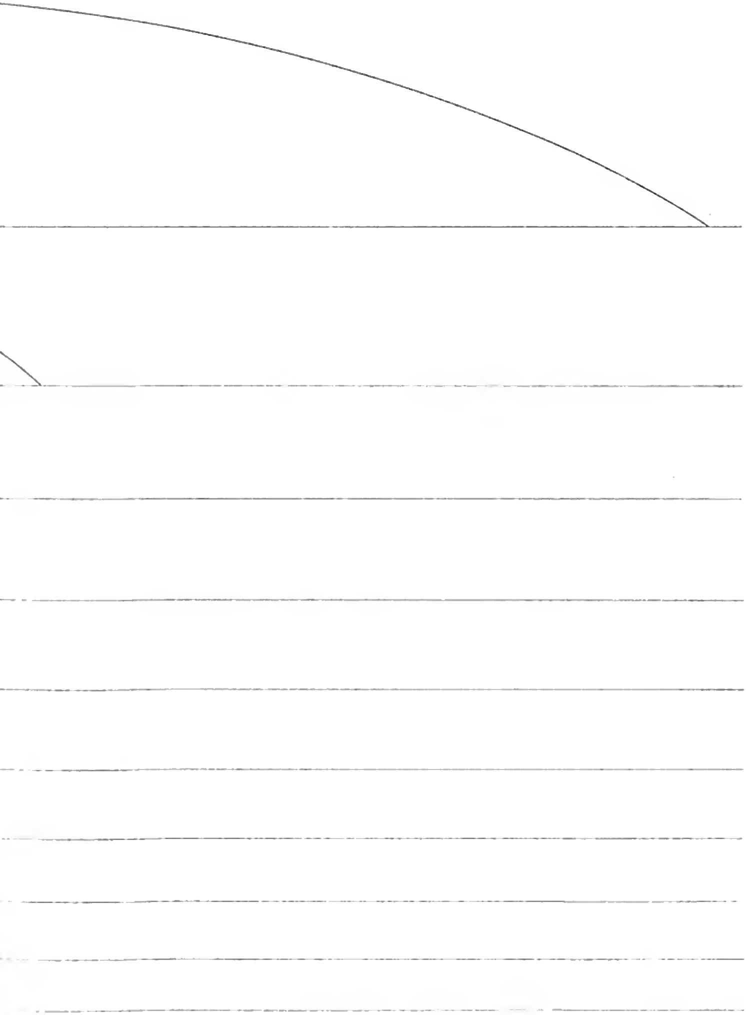


Digitized by Google



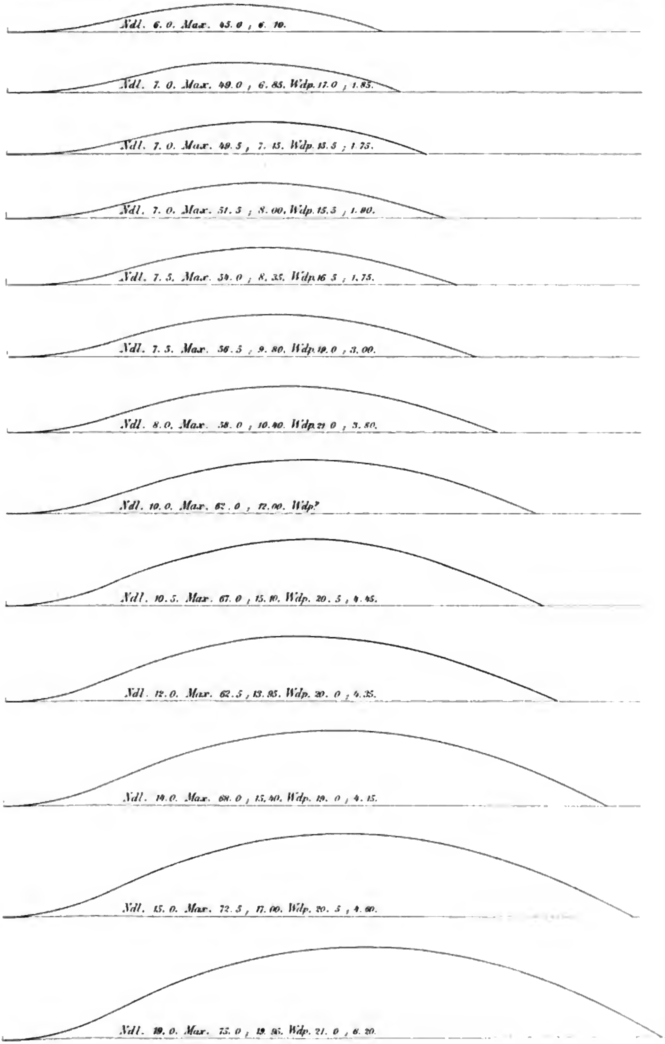
Ve

Digitized by Google



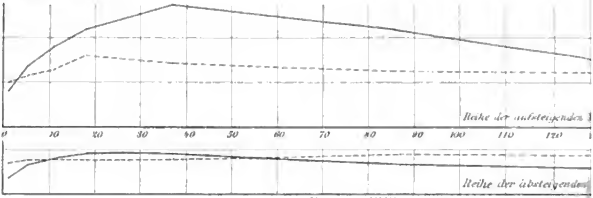
LVIII.

Digitized by Google

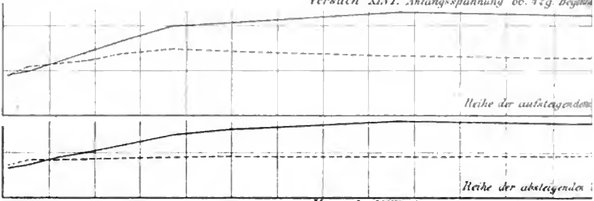


Versuch XVIII.

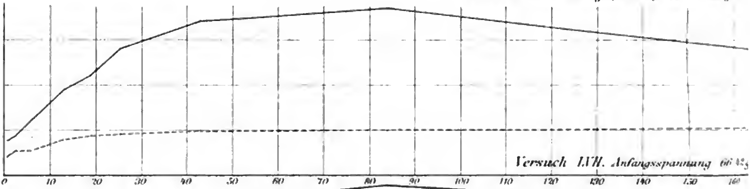
Digitized by Google



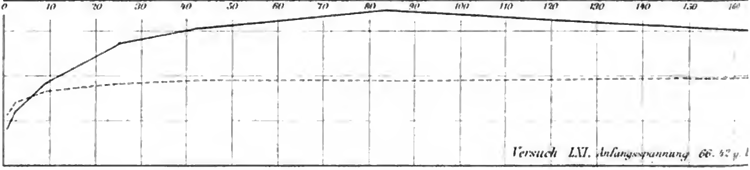
Versuch XLVI. Anfangsspannung 66.42 g. Beginn



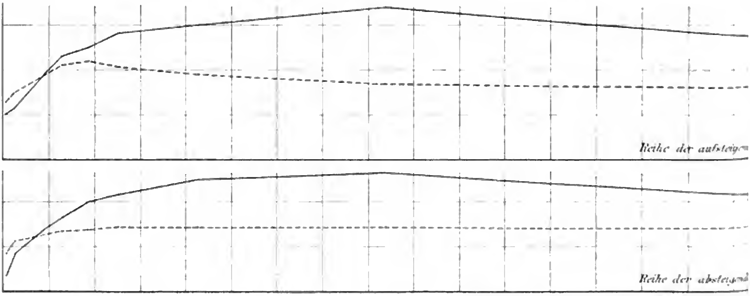
Versuch LVIII. Anfangsspannung 66.42. Begonn



Versuch LVII. Anfangsspannung 66.42 g

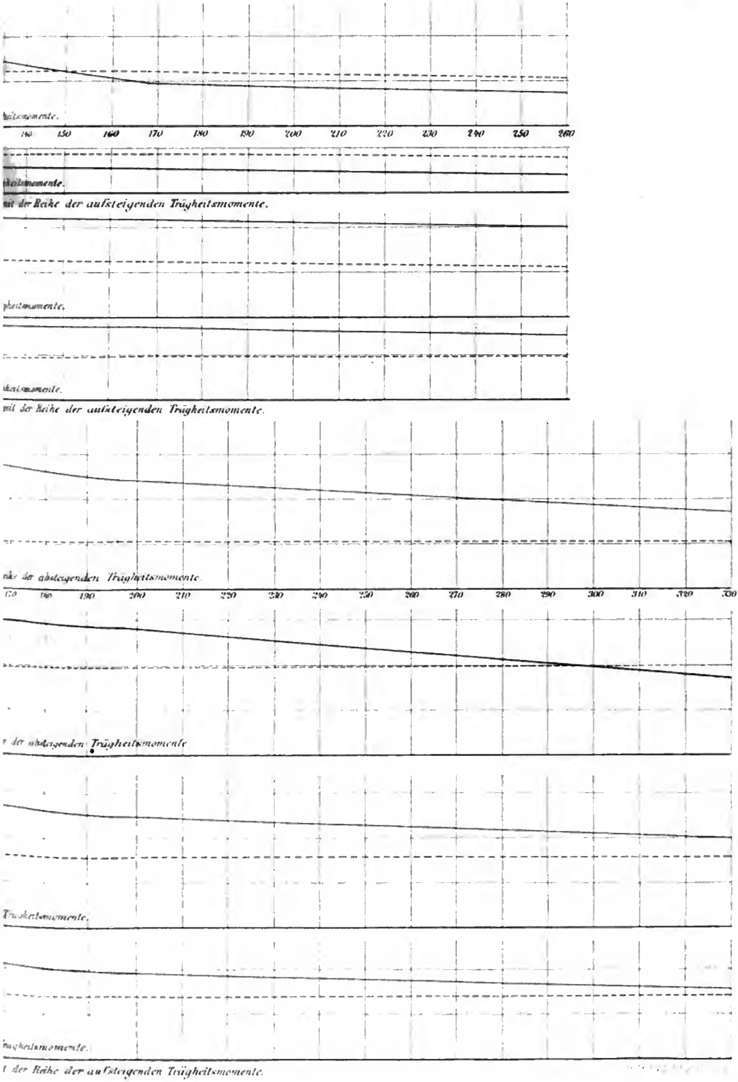


Versuch LXI. Anfangsspannung 66.42 g.



Versuch. LX. Anfangsspannung 66.42 g. Begonn

Digitized by Google



Digitized by Google

I.

ÜBER

AUFNAHME UND AUSGABE UNGELÖSTER KÖRPER.

II.

ZUR KENNTNISS

DER PLASMAHAUT UND DER VACUOLEN

NEBST BEMERKUNGEN

ÜBER DEN AGGREGATZUSTAND DES PROTOPLASMAS

UND ÜBER OSMOTISCHE VORGÄNGE

VON

W. PFEFFER,

MITGLIED DER KÖNIGL. SÄCHS. GESELLSCHAFT DER WISSENSCHAFTEN.

Des XVI. Bandes der Abhandlungen der mathematisch-physischen Classe der Königl. Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften

Nº II.

MIT TAFEL I UND II UND EINEM HOLZSCHNITT.

LEIPZIG

BEI S. HIRZEL

1890.

Digitized by Google

Vorgetragen in der Sitzung vom 10. Februar 1890.
Manuscript eingeliefert am 6. März 1890.
Der Abdruck vollendet am 20. Juni 1890.

Digitized by Google

ÜBER
AUFNAHME UND AUSGABE
UNGELÖSTER KÖRPER

VON

Dr. W. PFEFFER.

MIT TAFEL I.

Digitized by Google

I. Einleitung.

Eine Aufnahme fester Partikel aus der äusseren Umgebung ist natürlich nur möglich, wenn, wie in den Plasmodien der Myxomyceten, nackte Protoplasmakörper vorliegen. Bei Vorhandensein einer rings geschlossenen Zellhaut ist indess ein analoger Austausch zwischen Protoplasma und Vacuolenflüssigkeit möglich und wird auch thatsächlich ausgeführt. Über diesen Vorgang liegen bis dahin freilich nur beiläufige Beobachtungen vor[1]) und ein etwas eingehenderes Studium war um so mehr geboten, als die Realität eines solchen Austausches fester Partikel zwischen Protoplasma und Zellsaft in jüngerer Zeit von Wakker[2]) ganz in Abrede gestellt wurde. Die Unrichtigkeit dieser Behauptung wird in Folgendem aber durch unzweifelhafte Beobachtungen dargethan werden, welche sachgemäss zunächst die Aufgabe hatten, die Befähigung und die Thatsache eines Übergangs fester Partikel aus dem Zellsaft in das Protoplasma, oder umgekehrt, festzustellen. Damit ist natürlich noch nicht gesagt, dass ein solcher Vorgang eine weitere Bedeutung in den Functionen einer Zelle erlangen muss und in dieser Hinsicht werden erst fernere Studien eine Entscheidung von Fall zu Fall zu treffen haben.

In causaler Hinsicht reihen sich übrigens die Vorgänge in hautumkleideten Zellen dem Austausch in dem Plasmodium von Myxomyceten an, in welchem sowohl eine Aufnahme (resp. Ausgabe) fester oder unlöslicher Partikel aus der äusseren Umgebung, als auch eine Überführung der aufgenommenen Partikel aus dem Protoplasma

1) Vgl. Pfeffer, Physiologie Bd. I, p. 41; Untersuchungen a. d. botan. Institut in Tübingen 1886, Bd. II, p. 297, 188.

2) Jahrbücher f. wiss. Botanik 1888, Bd. XIX, p. 468 u. s. w.

Digitized by Google

in eine Vacuole stattfinden kann. Da aber bei Myxomyceten solche Aufnahme und Ausgabe fester Körper viel leichter verfolgt und controlirt werden kann, so ist es geboten, zunächst die Plasmodien der Myxomyceten in dieser Hinsicht zu behandeln.

II. Versuche mit dem Plasmodium der Myxomyceten.

A. Aufnahme.

Die Beobachtungen beziehen sich, soweit nichts Anderes bemerkt, auf Chondrioderma difforme (Pers.) (Syn. Physarum album, Didymium Libertianum).

Die Aufnahme fester Partikel in die Plasmodien der Myxomyceten ist durch de Bary[1]) und Cienkowski[2]) näher bekannt und zwar werden, was de Bary[3]) noch zweifelhaft liess, völlig indifferente anorganische Stoffe sowie die verschiedensten organischen Körpertheile ungefähr gleich leicht aufgenommen[4]). Aber auch Tröpfchen von flüssigen fetten Ölen werden ebenso von den Plasmodien verschluckt.

Unabhängig von der Qualität solcher unlöslicher Partikel vollzieht sich die Aufnahme allgemein in der von den vorgenannten Forschern geschilderten Weise, indem das fortrückende Plasmodium einen Körper erreicht und umfliesst[5]), oder indem ein solcher, nachdem er auf die Oberfläche eines Plasmodiums gebracht ist, unter ähnlichen Umständen in den Protoplasmakörper eingesenkt wird. Der Mithülfe von Pseudopodien bedarf es dabei nicht, doch können diese gelegentlich zuerst den Körper erreichen oder umfassen. Auch kann es geschehen, dass ein festes Theilchen zwischen zwei sich nähernde Plasmodienstränge eingeklemmt und mit deren Verschmelzung in das Innere des Plasmodiums gedrängt wird.

Ein näheres Eingehen auf die kleinen formellen Differenzen hat keinen Zweck. Allgemein kommt es doch darauf hinaus, dass

1) Mycetozoen, II. Aufl., 1864, p. 92.

2) Jahrb. f. wissenschaftl. Botanik 1863, III, 334, 414.

3) Pilze 1884, p. 486.

4) Vgl. Pfeffer, Unters. a. d. botan. Institut in Tübingen 1886, Bd. II, p. 297.

5) Abbildungen bei Cienkowski, l. c. Taf. XVIII, Fig. 6. Vgl. auch die folgende Abhandlung Taf. II, wo Fig. 1, 2, 3 aufgenommene Fremdkörper zeigen.

Digitized by Google

der feste Körper durch das Hyaloplasma[1]) in das Körnerplasma gelangt. Dabei ist jede Stelle des Plasmodiums zur Aufnahme befähigt und zwar ebensowohl bei verschwindend geringer, wie bei mächtiger Entwicklung einer hyalinen Hautschicht. Die dem Körnerplasma einverleibten Körperchen werden mit der Strömung in jenem herumgeführt und früher oder später wieder aus dem Plasmodium ausgestossen. Im Plasmodium verharren die Fremdkörper entweder im Protoplasma oder werden wohl auch in eine Vacuole übergeführt.

In causaler Hinsicht kam ich schon früher[2]) zu dem Schlusse, dass die festen Körper mechanisch in das Plasmodium gepresst werden, sei es durch ihr eigenes Gewicht oder durch den Widerstand, welchen sie der Fortbewegung des Plasmodiumzweiges entgegenstellen. Die Entbehrlichkeit chemischer Reize zur Erzielung der Aufnahme folgt ohne weiteres aus dem Eintritt beliebiger indifferenter und ganz unlöslicher Partikel. Dass aber ein Contactreiz entbehrlich ist, geht daraus hervor, dass sehr leichte Körperchen, wie die Sporen von Penicillium, wenn sie mit dem fortrückenden Saume des Plasmodiums fortgeschoben werden, in diesem an den Berührungsstellen keine Hemmung des Ausgestaltens erzielen. Späterhin beobachtete ich dasselbe, als schwimmende Infusorien (Coleps hirtus und Glaucoma scintillans) an das Plasmodium anstiessen, und als an diesem ein Bodo saltans mit einer Cilie haftete und durch seine Bewegungen wiederholt Zerrungen an dem Haftpunkt veranlasste.

Auf Grund dieser Beobachtungen kann indess immerhin nur behauptet werden, dass wenigstens eine hohe Sensibilität gegen Stoss und Contact nicht besteht, dass ferner mechanische Pressung ausreicht, um feste und auch unlösliche flüssige Stoffe ins Innere des Plasmodiums zu befördern. Ob aber mit stärkerem Drucke nicht auch eine gewisse Reizung ausgelöst wird, muss um so mehr dahin gestellt bleiben, als die verschiedensten Veranlassungen hemmend und beeinflussend auf die ja bei der Aufnahme von Partikeln mitwirkende Gestaltung eines Plasmodiums wirken[3]).

1) Hyaloplasma und Körnerplasma sind in dem in folgender Abhandlung Kap. I näher bezeichneten Sinne zu nehmen.

2) Unters. a. d. Tübinger Institut, l. c., p. 299.

3) Bei localer Gestaltungshemmung durch Reiz würde etwa Analoges vorliegen, wie beim Umwachsen von Grashalmen durch Hutpilze (vgl. Pfeffer, Phy-

Digitized by Google

Da aber im Allgemeinen auf dem Substrat befindliche Körper durch die fortschreitende Bewegung erreicht und verschlungen werden, so haben natürlich alle anlockenden und abstossenden Reize einen Einfluss auf die Aufnahme. In diesem Sinne kommen selbstverständlich auch durch die Qualität eines Stoffes ausgeübte chemische Reize[1]) in Betracht, die also bei Anlockung fördernd, bei Abstossung hemmend auf die Aufnahme wirken. Ebenso kann es auch von Bedeutung für die Aufnahme werden, wenn ein Körper durch seine Qualität erst in Berührung mit dem Protoplasma chemische oder anderweitige Wirkungen erzielt.

Nähere vergleichende Untersuchungen über die mehr oder minder leichte Aufnahme stellte ich nicht an. Übrigens hätten diese nur Bedeutung, wenn sie in Rücksicht auf die causalen Verhältnisse durchgeführt würden, und in dieser Hinsicht ist stets ein ganzer Complex von inneren und äusseren Ursachen zu beachten. Jedenfalls ist schon die Bewegungstüchtigkeit ein wesentliches Moment und mit Sistirung dieser wird normalerweise überhaupt die Aufnahme fester Körper aufgehoben.

Alle Factoren, die Einfluss auf den von einem Körper ausgehenden mechanischen Widerstand haben, wie Grösse, Gewicht, Adhäsion an Substrat oder Plasmodium u. s. w. sind natürlich auch für die Einführung in das Plasmodium von Bedeutung. So ist schon mitgetheilt worden, dass Aufnahme unterblieb, als ein kleiner und am Substrat nicht adhärirender Körper vor dem Plasmodium hergeschoben oder als durch Wasserströmungen Contact mit diesem verhindert wurde. Dagegen scheint aus eckiger oder abgerundeter Form des Körpers kein allgemeiner Factor zu entspringen, wenigstens werden bei genügender Adhäsion am Substrate Tröpfchen von Olivenöl anscheinend ebenso leicht aufgenommen, als scharfeckige Kryställchen vom Baryumsulfat. Ein zu ansehnliches Volumen kann begreiflicherweise die Aufnahme ganz unmöglich machen, aber abgesehen davon scheinen

siologie Bd. II, p. 151). — Bei der Aufnahme von Öltropfen bewahren diese, nach übrigens nicht sehr kritischen Beobachtungen, die Kugelform und demgemäss können sehr ansehnliche locale Pressungen auf den aufzunehmenden Körper durch das Plasmodium nicht ausgeübt werden. Vgl. übrigens die folgende Abhandlung Kap. V.

1) Über chemische und andere Reize vgl. Stahl, Bot. Zeitung 1884, p. 163.

Digitized by Google

doch noch in Form und wohl auch in physikalischen Qualitäten der Stoffe Ursachen für Erleichterung oder Erschwerung der Aufnahme zu liegen. Ohne auf die nur beiläufigen Beobachtungen einzugehen, welche auf solche Einflüsse hindeuten, mag hier nur bemerkt sein, dass in einem Versuche mit Chondrioderma Stückchen von gequollener Gelatine augenscheinlich relativ schwer in ein Plasmodium gelangten, welches lebende Pollenkörner und Vitellinkryställchen, also andere wasserdurchtränkte Körper, sehr leicht aufnahm. Auch schwer lösliche Stoffe, wie Gypskryställchen, werden in gesättigter Lösung ebenso leicht aufgenommen, wie unlösliche feste Partikel, während natürlich die Einführung erschwert wird, wenn die Concentration oder die Qualität der Lösung Einfluss auf die Bewegung des Plasmodiums hat.

Wie todte Körper werden aber auch kleine lebende Organismen verschluckt. Ausser Pollenkörnern und Sporen (auch von Chondrioderma) gelangten bei Darbietung u. a. auch Pleurococcus, Diatomeen, Pandorina morum, Chlamidomonas pulvisculus, kleine Pflänzchen von Oedogonium und Nostoc u. s. w. im lebenden Zustand in das Plasmodium von Chondrioderma. Dagegen kommen Infusorien und andere lebhaft und kräftig bewegte Organismen nicht zur Aufnahme, wenn sie nach dem Anstossen an ein Plasmodium immer wieder enteilen. Ebenso verhielt sich Bodo saltans, von dem indess ein Exemplar einmal aufgenommen wurde, als es mit den Wimpern am Plasmodium haften geblieben war. Auch von Pandorina[1]) und Chlamidomonas gelangten nur solche Individuen in das Plasmodium, die entweder an diesem haften blieben, oder die an sich keine oder nur geringe locomotorische Bewegung entwickelten, und Gleiches gilt auch hinsichtlich der Aufnahme der ja immer relativ langsam bewegten Diatomeen. Da Pollenkörner, grössere Sporen und Pleurococcus leicht aufgenommen wurden, so muss die anscheinend schwierigere Verschlingung der anderen obengenannten Organismen auf Umständen beruhen, welche wenigstens nicht allgemein im lebendigen und im wasserdurchtränkten Zustand begründet sind.

In Erwägung, dass die heterogensten Dinge in das Plasmodium

---

1) Unter Anhaften von Pandorina, auch bezüglich Chlamidomonas, vgl. Pfeffer, Unters. a. d. botan. Institut in Tübingen, Bd. I, p. 443 und Bd. II, p. 613.

Digitized by Google

eingeführt werden, dass aber der Erfolg immer von mechanischen Pressungen abhängt, kann nicht etwa Benetzung und damit zusammenhängende Ausbreitung des Plasmodiums um den Fremdkörper den entscheidenden Factor abgeben. Schon dieserhalb und anderer Überlegungen halber ist es sicher nicht Folge so einfacher physikalischer Verhältnisse, wie es Berthold[1]) will, dass wohl die Plasmodien derselben Art sich leicht vereinigen, die verschiedener Myxomyceten aber, so weit bekannt[2]), nicht verschmelzen.

Chondrioderma difforme, das ich hauptsächlich benutzte, bietet durch relativ lange Dauer des Plasmodiumzustandes, leichte Beweglichkeit und grosse Durchsichtigkeit in vieler Hinsicht Vortheile gegenüber Aethalium septicum (Fuligo varians) und Didymium serpula, die übrigens, so weit ich untersuchte, sich hinsichtlich der Stoffaufnahme wesentlich gleich verhalten. Vielleicht ist eine kurze Angabe, wie das auch von anderen Forschern schon vielfach verwendete Chondrioderma leicht zu cultiviren ist, erwünscht. Stücke des Stengels von Faba vulgaris, die ich getrocknet vorräthig halte, werden nach dem Aufweichen in mässiger Menge mit etwas Wasser so in eine Glasschale gebracht, dass die einzelnen horizontal liegenden Stengel theilweise in Luft befindlich sind. Nach dem Sterilisiren in Wasserdampf werden dann Sporen ausgesäet und nach 6 bis 14 Tagen kann man auf Entwicklung von Plasmodien rechnen, die von den Stengeln auch an die Glaswand kriechen. Indem man diese Plasmodien entweder in etwas abfiltrirte Culturflüssigkeit in Uhrschalen oder auch sogleich in Wasser auf Objectträger bringt und sich ausbreiten lässt, gelingt es, sie genügend frei von umhüllenden Fremdkörpern, sowie von fremden Ingesta zu erhalten. Wenn nöthig kann man auch den Rheotropismus zum Herauslocken nutzbar machen. Die auf Objectträgern in Wasser ausgebreiteten Stückchen solcher Plasmodien liefern dann geeignetes Versuchsmaterial.

Zur Erzielung von Aufnahme kann man die in Wasser genügend fein vertheilten Körper auf offenem Objectträger oder unter Deckglas mit entsprechenden Vorsichtsmassregeln darbieten. Bei Operationen mit Öl ist z. B. der Objectträger umgekehrt aufzustellen, damit die specifisch leichteren Öltropfen derjenigen Glasplatte sich anlegen, auf welcher sich das Plasmodium ausbreitet. Behufs feiner Vertheilung bereitete ich mittelst etwas arabischem Gummi eine Emulsion aus Olivenöl, das zuvor mit Alkanna tief gefärbt worden war und befreite diese Emulsion von den grösseren Öltropfen,

1) Studien über Protoplasmamechanik, 1886, p. 108.

2) Vgl. de Bary, Mycetozoen 1864, II. Aufl., p. 10; Cienkowski, Jahrb. f. wiss. Bot. 1863, Bd. III, p. 337. Hinsichtlich der Rhizopoden vgl. M. Schultze, Protoplasma d. Rhizopoden u. Pflanzenzellen, 1863, p. 25.

Digitized by Google

indem ich durch nasse Leinwand laufen liess. Sehr kleine gefärbte Öltropfen erhält man auch, indem man Milch mit Wasser unter Zusatz von etwas alkoholischer Alkannatinctur schüttelt und die sich nach einiger Zeit an der Oberfläche sammelnden Fettkügelchen verwendet. Übrigens werden auch grössere Öltropfen bis zu 0,04 mm leicht aufgenommen (vgl. Taf. II, Fig. 3).

Ist das Plasmodium sehr bewegungstüchtig, und wird durch den Zusatz eines Körpers keine Hemmung dieser Thätigkeit erzielt, so kann sogleich die Aufnahme beginnen, und im Laufe von $1/2$ bis 1 Stunde trifft man bei reichlicher Zufuhr fester Partikel oft schon eine ganze Anzahl dieser im Plasmodium an. Ein gleiches Resultat wird auch bei Zugabe schwer löslicher und an sich unschädlicher Körper, wie z. B. durch Gyps erzielt, während das löslichere Asparagin in gesättigter Lösung durch Contractionen des Plasmodiums die Aufnahme erschwert und oft verhindert. Die Aufnahme löslicher Stoffe aus gesättigter Lösung soll indess hier nicht weiter behandelt werden, da davon in der nächsten Abhandlung Gebrauch zu machen ist. Erwähnt mag hier nur sein, dass von schwer löslichen Stoffen, ausser für Asparagin und Gyps, Aufnahme u. a. für Phloridzin, Tyrosin, Hypoxanthin, Murexid, Gentianablau constatirt wurde.

Von in Wasser nicht oder kaum löslichen Stoffen wurde u. a. Aufnahme constatirt für Quarz und andere Gesteinsfragmente, Baryumsulfat, Bleisulfat, normales Kaliumphosphat, Zinnober, Indigo, Carmin, Calciumoxalat, Stärke, Krystalle von Vitellin, Alizarin, fettes Öl. Diese und die Erfahrungen mit lebenden Organismen lassen keinen Zweifel, dass wohl alle indifferenten Stoffe aufgenommen werden können. Thatsächlich gelangt auch Detritus verschiedenster Art in die Plasmodien, in welchen man u. a. auch kleinere oder grössere Zellfragmente und zuweilen ziemlich lange Stücke von Baumwollenfasern u. s. w. findet.

Wie schon bemerkt, verhalten sich Aethalium septicum und Didymium serpula nach eigenen und den in der Literatur vorliegenden Angaben wesentlich wie Chondrioderma difforme. Bei der Abhängigkeit der Aufnahme von mannigfachen Umständen ist es aber verständlich, dass jene in verschiedenen Experimenten mit derselben Art, ja sogar für zwei Äste desselben Plasmodiums ungleich ausgiebig werden kann und dass so bei nur beiläufigen Versuchen über solche Aufnahme auch ein ungünstiges Resultat erhalten werden kann. So ist es auch zu erklären, dass de Bary[1]) für Didymium serpula reichliche, für Chondrioderma difforme (Didymium Libertianum) keine oder minimale Aufnahme von Carminkörnchen fand, obgleich diese thatsächlich von dem letzgenannten Plasmodium sehr leicht und reichlich verschluckt werden. Ebenso ist aus dem wohl nur zufälligen Mangel von Fremdkörpern in Lycogala[2]) noch nicht auf Unfähigkeit für Aufnahme fester

1) Mycetozoen, 1864, II. Aufl., p. 94.

2) Pilze 1884, p. 487.

Digitized by Google

Körper zu schliessen, da Aufnahme bisher immer dann gelang, wenn die richtigen Bedingungen hergestellt waren. Solches hat auch in jüngerer Zeit Lister[1]) für Badhamia utricularis und Brefeldia maxima erwiesen. Auch scheinen Amöben[2]) sich wesentlich wie Plasmodien von Myxomyceten zu verhalten.

Da aber die Aufnahme in erster Linie von Eigenschaften und Thätigkeiten der Plasmodien abhängt, so kann jene natürlich mit diesen zurücktreten und solches Zurücktreten der Aufnahme muss schon unzureichende oder ungeeignete Bewegung erzielen. So ist die Existenz von Plasmodien nicht ausgeschlossen, die normal keine festen Körper verschlucken. Andererseits ist aber auch zu erforschen, ob z. B. der Mangel von Fremdkörpern in den Myxamöben[3]) wirklich auf Unfähigkeit für Aufnahme von festen Partikeln zurückzuführen ist.

B. Ausstossung.

Die festen Partikel gelangen, wie schon bemerkt wurde, der Regel nach durch die Hautschicht und die relativ ruhenden peripherischen Schichten des Protoplasmas in das strömende Körnerplasma, in dem sie mit fortgeführt werden. Allmählich werden die aufgenommenen Fremdkörper wieder ausgestossen, nachdem sie entweder dauernd im Protoplasma verblieben, oder nachdem sie inzwischen in Vacuolen übertraten. Letzteres trifft bei unlöslichen Körpern gewöhnlich nur einen kleineren, übrigens sehr verschiedenen Theil, und offenbar spielen hierbei Zahl der Vacuolen und andere zufällige Verhältnisse in nicht näher controlirter Weise mit. Dass dagegen Körper, welche im Protoplasma Lösung erfahren, in grösserer Zahl oder bei intensiver Lösung auch sämmtlich in Vacuolen erscheinen (vgl. folgende Abhandlung Taf. II, Fig. 1 u. 2), hat seinen Grund darin, dass eben durch die Auflösung die Entstehung von Vacuolen bedingt wird, wie das näher in der folgenden Abhandlung gezeigt werden soll. So kommt es auch, dass Stoffe, die Nährmaterial liefern können, häufiger in Vacuolen erscheinen. Doch ist solche Aufnahme, die ebenso reichlich indifferente sich lösende Stoffe trifft, durchaus nicht nothwendig, um als Nahrung zu

---

1) Annals of botany 1888/89, Bd. II, p. 5.

2) Vgl. Meissner in Zeitschrift f. wiss. Zoologie 1888, Bd. 46, p. 498 und die dort citirte Literatur. Ferner Hofer, Experimentelle Unters. über den Einfluss des Kerns auf das Protoplasma, 1889, p. 53.

3) Vgl. de Bary, Pilze, 1884, p. 486.

Digitized by Google

dienen. Denn z. B. Kryställchen von Vitellin, todte Pollenkörner oder andere pflanzliche Fragmente, die offenbar zur Ernährung beitragen können, gelangen gelegentlich, während ihres ganzen Aufenthalts im Plasmodium, nicht in Vacuolen.

Das Ausstossen aus dem Plasmodium trifft in gleicher Weise die in Vacuolen und im Plasma liegenden Körper. Auch konnte ich keinen bestimmten Unterschied zwischen indifferenten und wahrscheinlich Nahrung liefernden Stoffen bemerken. Wenigstens wurden Baryumsulfat, Carmin, Indigo u. s. w. anscheinend nicht schneller aus dem Plasmodium entfernt, als Kryställchen von Vitellin, Stückchen von coagulirtem Albumin und todte oder lebende Pollenkörner und Sporen. Da aber noch nicht sicher ermittelt ist, in wie weit die letztgenannten Körper Nahrung liefern, muss doch dahin gestellt bleiben, ob besonders gute Nährmaterialien nicht bevorzugt zurückgehalten werden[1]. Jedenfalls wurden die oben genannten Stoffe ausgestossen, während sie noch organische Nahrung reichlich bieten konnten.

Als eine Folge der Tendenz, die Fremdkörper auszustossen, werden die Plasmodien allmählich von den fremden Einschlüssen befreit, sobald fernere Aufnahme ausgeschlossen ist, und die üblichen schleimigen Reste nebst den ausgegebenen Fremdkörpern kennzeichnen den Weg, welchen ein Plasmodium unter Wasser oder auf feuchtem Substrate zurücklegte. Nach 24 Stunden ist so die Zahl der Fremdkörper zumeist schon sehr weitgehend vermindert und nach 2 bis 4 Tagen pflegen dieselben ganz entfernt zu sein.

In diesem Ausstossen treten die eingeführten Fremdkörper in scharfen Gegensatz zu den geformten Bausteinen des Plasmakörpers, welche in diesem, trotz weitgehender Verschiebung in der räumlichen Lagerung, verharren, während todte Plasmatheile sich wiederum wie Fremdkörper verhalten, gleichviel ob dieselben durch locales Absterben im Plasmodium oder durch Einführen von aussen in unsere Organismen gelangten[2]. Offenbar müssen für dieses

1) In dieser Hinsicht geben auch die Beobachtungen von Lister (Annals of botany 1888/89, Bd. II, p. 7, 14) über Verdauungswirkungen im Plasmodium von Badhamia keinen bestimmten Aufschluss.

2) Damit soll durchaus nicht gesagt sein, dass alle im Protoplasma verharrenden geformten Körper Organe dieses sein müssen. Solche sind ja Öltröpfchen und Körnchen von Calciumcarbonat nicht, welche letzteren thatsächlich in vielen

Digitized by Google

Zurückhalten der lebendigen Bausteine, wie es auch nicht anders sein kann, bestimmte Wechselbeziehungen der Organe des Protoplasten entscheidend werden. Diese Erwägungen aber drängen auch die Frage auf, ob etwa irgend innere Wechselbeziehungen umgekehrt in Beziehung zum Ausstossen des Fremdkörpers stehen, und eine solche durch Reize vermittelte Beziehung ist natürlich noch möglich, wenn, wie es ja Thatsache, die Gestaltungen und Bewegungen des Plasmodiums die mechanischen Mittel der Ausführung liefern. Denn es fragt sich ja eben, ob diese mechanischen Mittel zum Zwecke des Ausstossens in bestimmte Bahnen gelenkt werden, oder ob die von den Fremdkörpern und ihren Wirkungen unabhängigen Gestaltungen und Bewegungen das Ausstossen der Fremdkörper je nach den zufälligen Constellationen mechanisch verursachen. Auf diese Fragen gerichtete Untersuchungen sind noch nicht angestellt und die derzeitigen Beobachtungen gestatten keine bestimmte Beantwortung. Ich erinnere deshalb nur daran, dass nicht nur die amöboid bewegten Plasmodien fortwährend Fremdkörper ausstossen können, sondern dass auch mit den zur Bildung des Fruchtkörpers führenden Gestaltungen eine Entfernung der fremden Inhaltskörper verknüpft zu sein pflegt[1]). Gleiches scheint aber überhaupt zuzutreffen, wenn die ausgebreiteten Plasmodien in Folge äusserer Anstösse oder innerer Ursachen zu compacteren Massen allmählich sich zusammenziehen. Doch ist damit ja immer eine Bewegung und Ge-

Plasmodien sehr reichlich gebildet werden und während des amöboiden Zustandes entweder nicht oder doch immer nur in beschränktem Maasse ausgestossen werden, während mit Bildung der Sporangien und mehr oder weniger auch bei Entstehung von Sclerotien diese Kalkkörnchen ganz oder zum grössten Theil entfernt zu werden pflegen. Es ist dies also ein Fall von einem relativen Zurückhalten an sich todter Massen, der um so mehr eine nähere Aufhellung fordert, als von aussen aufgenommene Kalkkörnchen, wie andere Fremdkörper, von dem Plasmodium ausgestossen werden. Vgl. Zopf in Schenk's Handbuch d. Botanik, 1887, Bd. III, 2, p. 72, 29; de Bary, Pilze, 1884, p. 456, 461, 463.

1) Vgl. de Bary, Pilze 1884, p. 486; Mycetozoen 1864, II. Aufl., p. 94. Hierher gehört auch das von Kühne (Unters. über das Protoplasma 1864, p. 33, 48) beobachtete Ausstossen von Fremdkörpern aus Amöben in Folge elektrischer Reizung und plasmolytischer Wirkung, ebenso die von Zopf (Zur Morphologie und Biologie d. niederen Pilzthiere 1885, p. 18) erwähnte Ausgabe von Fremdkörpern aus Monadineen bei Mangel an Sauerstoff. (Vgl. auch Pfeffer, Unters. a. d. botan. Institut in Tübingen, Bd. II, p. 298.)

Digitized by Google

staltung verknüpft und ohne solche hört naturgemäss auch das Ausstossen von Fremdkörpern auf.

Die unmittelbare Beobachtung lehrt, dass die festen Körper entweder, in umgekehrter Richtung wie bei der Aufnahme, durch die Hautschicht dringen, welche sogleich hinter ihnen wieder zusammenschliesst, oder dass sie mitsammt einer Vacuole ausgestossen werden. In diesem Falle wird in der an die Peripherie gedrängten Vacuole die trennende Hautschicht dünner und dünner, bis endlich ein Einreissen in analoger Weise eine Entleerung des gesammten Inhalts nach aussen erzielt, wie bei anderen Pflanzen eine Überführung in den Zellsaft, durch Verschmelzung von Vacuolen mit diesem, erreicht wird.

Ist solches Einreissen wohl nur Folge rein physikalischer Verhältnisse, so wird doch die Beförderung an die Peripherie in jedem Falle durch die Bewegungsvorgänge im Plasmodium vermittelt. Wenn nun auch die peripherische Schicht des Plasmodiums nicht gerade Strömungsbewegungen bietet, so bedarf es doch mechanischer Arbeit, um die aufgenommenen Partikel weiter zu befördern und so ihr Ausstossen aus einer relativ consistenteren Masse zu erreichen. Zu diesem Zwecke sind nicht gerade auffällige Bewegungen in dem Aussenplasma nöthig, und auch unabhängig von der Strömung des Innenplasmas kann sich dieser Act des Hinausbeförderns vollziehen. Doch kann auch die in der Strömungsbewegung gebotene Energie thätig eingreifen und das tritt klar zuweilen dann hervor, wenn nicht zu kleine Partikel in zu enge Plasmodiumstränge getrieben werden und nun der Druck des aufgehaltenen Plasmastromes ein Hinausdrängen des Fremdkörpers veranlasst.

Aus diesen und anderen Erwägungen ist leicht zu verstehen, dass Form und Grösse der Fremdkörper einen Einfluss auf deren Entleerung haben können. Thatsächlich scheint das Ausstossen grösserer Partikel etwas schneller als das sehr kleiner von statten zu gehen, doch werden auch solche Fremdkörperchen entfernt, die kleiner als die Zellkerne und kaum grösser als die normal in dem Plasmodium vorhandenen Körnchen sind, deren Verbleib in dem Plasmakörper auch aus anderen Gründen nicht allein von ihren Dimensionen abhängig sein kann.

Nach den nur beiläufigen Beobachtungen scheinen unlösliche

Digitized by Google

Körper weit häufiger direct, als mit Hülfe von Vacuolen ausgestossen zu werden. Auch wenn sie in diese gelangten, ist doch ein directes Ausstossen möglich, da ziemlich häufig eine Rückbeförderung in das Protoplasma stattfindet. Es handelt sich ja beim Austausch mit Vacuolen im wesentlichen ebenso um Aufnahme oder Ausgabe fester Partikel, wie beim Austausch mit der das Plasmodium umgebenden Aussenflüssigkeit. Und wie auch bei Vacuolen mechanische Druckwirkungen zum Ziele führen, tritt z. B. dann klar hervor, wenn durch die Stromkraft Vacuolen deformirt und gezerrt werden[1]) und dabei gelegentlich ein fester Fremdkörper plötzlich in das Protoplasma oder auch umgekehrt in die Vacuole befördert wird. Wie schon gesagt, muss aber durchaus nicht jeder aufgenommene Körper einmal in eine Vacuole gelangen und bestimmte bleibende Nahrungsvacuolen[2]) gehen den Myxomyceten ab.

Aufnahme und Ausgabe fester Partikel wird von Myxomyceten in wesentlich analoger Weise ausgeführt, wie von Amöben[3]) und wenn bei anderen Rhizopoden[4]) in dem Erfassen und Einführen der Fremdkörper Pseudopodien in den Vordergrund treten, so handelt es sich immerhin doch nur um graduelle Verschiedenheiten. Entsprechend einer weitergehenden Differenzirung und Arbeitstheilung dienen in Infusorien sehr gewöhnlich nur bestimmte Stellen des Körpers zur Aufnahme und Ausgabe fester Körper und verschiedene Einrichtungen treten zum Zwecke der Herbeiführung und Einführung fester Nahrung hinzu[5]). Ob und in wie weit zu diesem Zwecke auch besondere Reizwirkungen in gegebenen Fällen eine Rolle spielen, ist noch nicht untersucht[6]). Da aber bekannt ist, wie selbst in nahe stehenden Organismen die Sensibilität wesentlich verschieden ausgebildet sein kann, ist wohl möglich, dass in anderen Arten von Myxomyceten Reize noch in anderer als in der früher besprochenen Weise für die Erreichung und Einführung fester Partikel mitwirken.

Die Bedeutung der Aufnahme fester Körper für die Ernährung der

---

1) Näheres darüber in Abhandlung II, Kap. V. Vgl. auch Taf. II, Fig. 7 u. 8.

2) Über Nahrungsvacuolen bei Infusorien vgl. Bütschli, Protozoa 1889, p. 1399, 1404.

3) Meissner, Zeitschrift für wiss. Zoologie 1888, Bd. 46, p. 498; Hofer, Experimentelle Unters. über den Einfluss d. Kerns auf das Protoplasma 1889, p. 53.

4) Bütschli, Protozoa 1889, 117, 444. Vgl. auch Famintzin, Beitrag zur Symbiose von Algen u. Thieren 1889, p. 28. (Separat. aus Memoires d. l'Acad. d. St. Pétersbourg VII. sér., Bd. 36.)

5) Bütschli, l. c. p. 1399, 694, 1016.

6) Vgl. Pfeffer, Unters. a. d. bot. Institut in Tübingen, Bd. II, p. 645.

Digitized by Google

Myxomyceten ist noch nicht kritisch untersucht und kann hier nur andeutungsweise behandelt werden. Der Gewinn an Nahrung aus aufgenommenen festen Partikeln kann keinem Zweifel unterliegen und die anscheinend schon gelungene Ernährung von Myxomyceten in flüssigem Medium[1]) spricht natürlich nicht dagegen, dass nöthigenfalls diese Organismen in anderen Fällen ihre ganze Nahrung aus in fester Form eingeführten Körpern beziehen können und eine solche doppelte Ernährung ist ja schliesslich sogar bei höheren Thieren möglich[2]). Nach den Erfahrungen Lister's[3]) üben die Plasmodien von Badhamia eine verdauende Wirkung auf die in ihnen befindlichen Körper aus, und auch die allmähliche Lösung von aufgenommenen Vitellinkrystallen[4]) ist wohl geeignet, zur Ernährung der Plasmodien beizutragen. Öltropfen werden anscheinend in Chondrioderma weder emulgirt noch sonst verändert, und auch Stärke[5]) wird wenigstens nicht immer in Plasmodien angegriffen. Doch erklären sich die bezüglich der Stärke nicht übereinstimmenden Angaben vielleicht daraus, dass die Plasmodien specifisch und vielleicht auch nach Culturbedingungen verschiedene lösende Fähigkeiten entwickeln[6]). Kennen wir doch z. B. in Monas amyli einen den Schleimpilzen verwandten Organismus, der energisch lösend auf Stärke wirkt[7]). Ausserdem ist z. B. Vampyrella vorax[8]) auf Tödten und Verdauen kleiner Algen angewiesen, während sich z. B. Navicula spec. und Pandorina noch lebend erwiesen, als sie nach ungefähr 10stündigem Aufenthalt im Plasmodium vom Chondrioderma wieder ausgestossen wurden. Ob solches allgemein und für längere Zeit gilt, habe ich nicht untersucht. Uebrigens dürfte die Einführung lebender Organismen in Myxomyceten in mancherlei Beziehung nutzbar gemacht werden können, z. B. indem die fremden Organismen als physiologische Reagentien für Zustände im Plasma Verwendung finden. Auch schliesst sich hier z. B.

---

1) Vgl. de Bary, Pilze 1884, p. 478. Ob Bacterien, die auch von Plasmodien aufgenommen werden können, fehlten, ist nicht mitgetheilt.

2) Vgl. auch Bütschli, l. c., p. 1016, 1399.

3) Annals of Botany 1888/89, Bd. II, p. 7. Ausserdem Metschnikoff, Centralblatt f. Bacteriologie 1889, Bd. V, p. 513.

4) Mehr davon in der folgenden Abhandlung.

5) Nach Wortmann (vgl. de Bary, Pilze 1884, p. 487) wird in Aethalium septicum Stärke verändert. Dagegen sah Cienkowski (Jahrb. f. wiss. Bot. Bd. III, p. 335) in Physarum album (Chondrioderma difforme) Stärkekörner unverändert sich erhalten und ebenso Lister (l. c. p. 5) in Badhamia utricularis, während verkleisterte Stärke verdaut wurde. Auch in Amöben halten sich nach Meissner (l. c., p. 502) Stärke und ebenso Öltropfen unverändert.

6) Nach Wortmann (Zeitschrift f. physiol. Chemie 1882, Bd. 6, p. 316) hat die Natur der Nährstoffe Einfluss auf Production von Enzymen durch Bacterien.

7) Vgl. de Bary, Pilze 1884, p. 482.

8) Ebenda p. 481.

Digitized by Google

die Frage an, warum die früher genannten lebenden Organismen, wie im Allgemeinen alle Fremdkörper, ausgestossen werden, während z. B. die symbiotisch in Infusorien lebenden kleinen Algen in deren Plasmakörper dauernd verweilen. Es involvirt dieses übrigens eine allgemeine Frage, die mit Rücksicht auf die Organe der Plasmodien auch schon früher gestreift wurde.

II. Zellen mit Zellhaut.

A. Fähigkeit zum Austausch ungelöster Körper.

Vermöge der zähflüssigen Beschaffenheit gestattet das lebendige Protoplasma umhüllter Zellen, ebenso wie das der Plasmodien Aufnahme und Ausgabe fester Partikel[1]) und wenn beides seltener in hautumkleideten Zellen vorkommt, so ist das auf den Mangel der anderweitigen dazu nöthigen Bedingungen zu schieben. Thatsächlich ist ja auch in diesem Falle die leichte Darbietung beliebiger Fremdkörper ausgeschlossen, und wenn im Zellsaft geeignete feste Partikel vorhanden sind, so ist doch geringe Mächtigkeit des Protoplasmas oder der Mangel an geeigneten Bewegungskräften, die durch ihre Angriffsweise ein mechanisches Einpressen erzielen könnten, augenscheinlich oft die Ursache, dass ein Austausch von festen Körpern zwischen Protoplasma und Zellsaft häufig gar nicht beobachtet wird. Thatsächlich kann man aber einen solchen Austausch bei richtiger Auswahl der Pflanzen sicherstellen und unter entsprechenden Versuchsbedingungen gelang es auch, Fremdkörper mechanisch von aussen in den Protoplasmakörper zu pressen, resp. aus diesem zu entfernen.

Mit dem Nachweis solcher Fähigkeit und der Realität des Austausches fester Körper in concreten Fällen beschäftigen sich nun die folgenden Untersuchungen, in welchen zunächst analog wie bei den Beobachtungen an Myxomyceten nicht näher ins Auge gefasst ist, ob und in wie weit ein solcher Austausch Bedeutung in bestimmten Functionen der Protoplasten erlangte.

Eine solche Sicherstellung des Austausches fester Partikel war zunächst geboten, da bislang nur beiläufige Beobachtungen über

1) Vgl. Pfeffer, Physiol. I, p. 41, 44; Osmot. Untersuchung. 1877, p. 160 und Hofmeister, Pflanzenzellen 1867, p. 77.

Digitized by Google

diesen Gegenstand vorlagen und Wakker[1]) eine Aufnahme oder Ausgabe fester Partikel in das Protoplasma umhüllter Zellen, freilich mit Unrecht, überhaupt leugnete. Merkwürdigerweise finden bei Wakker die bekannten Vorgänge an Plasmodien keine Erwähnung, deren Berücksichtigung von vornherein bestimmt darauf hinweist, dass nur unter Bedingungen, die nicht in jeder Zelle geboten sind, ein Austausch fester Partikel zu erwarten ist. An geeigneten Objecten treten denn auch in das Protoplasma Kryställchen von Calciumoxalat ein, die nach Wakker stets nur im Zellsaft vorkommen sollen. So sind thatsächlich meine[2]) auf den Austausch von Calciumoxalat, gerbsaurem Methylenblau u. s. w. bezüglichen Beobachtungen vollständig richtig und es ist wohl nicht zweifelhaft, dass auch andere Forscher, wie z. B. Velten[3]) und van Tieghem[4]) Einnahme oder Ausgabe fester Partikel durch den Protoplasmakörper gesehen haben. Ein entscheidender Werth ist freilich auf diese und andere Angaben nicht zu legen, die nicht aus speciell auf unsere Frage gerichteten kritisch gesichteten Versuchen entsprangen.

Der Übertritt fester Partikel in das Protoplasma ist natürlich sichergestellt, wenn Ausscheidungen, die im Zellsaft ihren Ursprung nehmen, fernerhin auch im Protoplasma zu finden sind. Solches wurde in unzweifelhafter Weise in einigen Pflanzen beobachtet, in deren Zellsaft Niederschläge durch Methylenblau oder durch Wasserstoffsuperoxyd, ohne eine Schädigung des Lebens, hergestellt werden können. Für die Versuche mit dem genannten Farbstoff dienten insbesondere Wurzelhaare von Trianea bogotensis (Taf. I, Fig. 6—8) und die in ähnlicher Weise Methylenblau speichernden Zellen der Wurzelhaube von Hydrocharis morsus ranae (Taf. I, Fig. 5). Bringt man diese Pflanzentheile in Wasser, welches 0,001 — 0,005 Proc. Methylenblau enthält, so findet man nach ½ bis 3 Stunden den Zellsaft mehr oder weniger tief blau gefärbt und in ihm eine gewisse Zahl blauer Körnchen, wahrscheinlich gerbsaures Methylenblau, aus-

---

1) Jahrb. f. wiss. Botan. 1888, Bd. 19, p. 468, 491 u. s. w.

2) Unters. a. d. bot. Institut in Tübingen 1886, Bd. II, p. 188, 262, 297. Vgl. auch Pfeffer, Physiol. I, p. 41, 44.

3) Flora 1873, p. 97.

4) Annal. d. sciences naturell. 1875. VI. ser., Bd. I, p. 25.

geschieden[1]). Bei Faba vulgaris ruft, wie ich ebenfalls früher nachwies, Wasserstoffsuperoxyd in verschiedenen Zellen zunächst eine rothbraune Färbung hervor, die allein die Vacuolenflüssigkeit trifft, in welcher dann nach einiger Zeit das gelöste Oxydationsproduct sich mehr oder weniger weitgehend in braunrothen Körnchen und Körnchenaggregaten ausscheidet[2]). Ich benutzte wesentlich die Epidermis des Keimstengels (die Wurzelhaare ergaben übrigens analoges Resultat), indem ich Stücke dieses in 3- bis 5procentiges Wasserstoffsuperoxyd brachte und sobald rothbraune Fleckchen sich zeigten, Epidermisstreifen zur Beobachtung abzog. In Folge dieser Verletzung stellt sich nach einiger Zeit Protoplasmaströmung ein, welche in den beiden anderen Versuchsobjecten auch schon in den unverletzten Pflanzen vorhanden ist.

Diese so eingeführten und durch ihre Farbe stets leicht kenntlichen Fremdkörper entstehen also zunächst immer in der Vacuolenflüssigkeit und zwar ausser in der Hauptvacuole (dem Zellsaft) auch wohl in kleineren Vacuolen. Bei normal fortdauernder Protoplasmaströmung findet man dann nach ein oder einigen Stunden Zellen, in deren

---

1) Pfeffer, Unters. a. d. botan. Institut in Tübingen 1886, Bd. II, p. 186, 207 u. Taf. II, Fig. 5. — In einem Theil der Wurzelhaare von Trianea bemerkte ich Abweichungen von dem früher von mir beschriebenen Verhalten. Hatte ich früher schon jüngere Haare gefunden, die eine nur mässige Speicherung von Methylenblau erzielten, so begegnete ich jetzt auch solchen, die sich in allen Phasen der Entwicklung nicht mehr merklich färbten. Nach der Speicherung blieb theilweise, früheren Erfahrungen entsprechend (l. c., p. 211), die Exosmose des Farbstoffes zweifelhaft, während in anderen Haaren schon nach einigen Stunden weitgehende Entfärbung eintrat. Als Resultat der aufnehmenden und ausgebenden Thätigkeit kam es bei manchen dieser zu gar keiner merklichen Blaufärbung, wenn sie in 0,0001-proc. Farbstofflösung verweilten, in der andere Haare reichlich Methylenblau speichern (l. c., p. 198). Es kommen also hier individuelle Differenzen vor, welche nicht gerade für diese Pflanze, jedoch schon für andere früher beobachtet worden waren (l. c., p. 286). Auch können solche Unterschiede nicht überraschen, da ich seiner Zeit zeigte, dass jederzeit, z. B. durch Säure, die Exosmose des gespeicherten Methylenblaus zu erreichen ist und darauf hinwies, wie ein entsprechender Stoffwechsel in der Zelle gleichfalls zur Exosmose führen muss, die in anderen Fällen in derselben Pflanze fehlen kann. Die Zellen des übrigen Wurzelkörpers und die der Wurzelhaube behielten an den bezüglich der Wurzelhaare abweichenden Wurzeln das gespeicherte Methylenblau in sich, wie ich es auch früher beobachtete.

2) Pfeffer, Beiträge zur Kenntniss d. Oxydationsvorgänge in lebenden Zellen 1889, p. 9, 24.

Digitized by Google

Protoplasma ein einzelnes oder ein Aggregat von Körnchen eingebettet ist. Öfters begegnet man einem solchen Falle erst nach Durchmusterung vieler Zellen, doch kam es auch vor, dass die Mehrzahl der Zellen farbige Fremdkörper in dem Protoplasma enthielt.

Allerdings ist es nicht in jedem einzelnen Falle ganz leicht zu sagen, ob ein Körnchen im Protoplasma liegt oder dem Zellsaft angehört, aber der Vacuolenwand adhärirt und so mit den Protoplasmaströmungen fortgeführt wird[1]. Doch trifft man bei richtiger Beobachtung immer Fälle, in denen jeder Zweifel über die Lagerung im Protoplasma ausgeschlossen ist, und bei mächtigeren Plasmaschichten, wie sie die Wurzelhaare von Trianea local öfters bieten, kann der Farbkörper auch ziemlich entfernt von der Vacuolenwand im Protoplasma liegen.

Ausserdem aber gestattet die Plasmolyse lebender Zellen eine weitere Entscheidung, wie es die Fig. 3 bis 6 (Taf. I) zeigen, welche sich auf Zellen mit fortströmendem Protoplasma beziehen. Fig. 5 stellt eine Zelle aus der Wurzelhaube von Hydrocharis, Fig. 6 ein Wurzelhaar von Trianea vor, beide mit 5 Proc. Salpeter plasmolysirt, während Fig. 3 das Stück einer Epidermiszelle aus dem Keimstengel von Faba nach sehr allmählicher Plasmolyse mit 8 Proc. Salpeter vorführt. Die Lage der blauen und braunrothen Körnchen in den Plasmasträngen (ein Theil ist mit *a* bezeichnet) gestattet auch auf's Genaueste zu controliren, dass sie nur im Plasma, nicht etwa in kleinen Vacuolen liegen. Freilich kommt solche Lagerung in farbigen oder farblosen Vacuolen vor und ist auch in Fig. 3 und in Fig. 6 zu erkennen.

In Fig. 3 ist der allerdings selten beobachtete Fall gezeichnet, dass während der Plasmolyse aus dem fortströmenden Plasma einige Körnchen des Oxydationsproductes nach aussen transportirt wurden und ihren vollendeten Übergang in die Salpeterlösung durch Beginn von Molekularbewegung kennzeichneten. Unter solchen Verhältnissen wurde auch direct beobachtet, dass aus sich verkleinernden Vacuolen

1) Dieses Mitschleppen adhärirender Partikel ist leicht (z. B. in Trianea u. s. w.) zu beobachten und lange bekannt. Vgl. z. B. Pfeffer, Pflanzenphysiol. II, p. 379; Unters. a. d. bot. Institut in Tübingen Bd. II, p. 188, 218; Nägeli und Schwendener, Mikroskop II. Aufl., p. 390; Wakker, Jahrb. f. wiss. Botanik, Bd. XIX, p. 445. Ebenso die an diesen Stellen citirte weitere Literatur.

Digitized by Google

einzelne braunrothe Körnchen in das Protoplasma übertraten. Wenn unter diesen Umständen auch die mit der Plasmolyse resp. der Volumabnahme u. s. w. verknüpften Constellationen für solche Übergänge begünstigend waren, so wird doch mit der Thatsache immerhin die Befähigung des Protoplasmas zum Austausch fester Partikel demonstrirt. Ausserdem aber wurde auch Austausch zwischen Zellsaft und Protoplasma, wie noch mitzutheilen ist, unter normalen Verhältnissen direct beobachtet und unter solchen treten ebenfalls die schon erwähnten Körnchen über, welche in dem Protoplasma der nicht plasmolytischen Zellen beobachtet wurden.

Nach dem Gesagten müssen sich nothwendig unsere Farbkörper in dem abgestorbenen Plasma finden, wenn durch plasmolytische Wirkung die Abtrennung der Vacuolenwand erreicht wird. Diese Thatsache wird auch durch die Figuren 2 (Stengelepidermis von Faba), ferner 7 und 8 (Wurzelhaare von Trianea) vorgeführt[1]), in denen einzelne Farbkörper ausserhalb des noch von der Vacuolenwand umschlossenen Zellsaftes theilweise direct im Plasma, theilweise in vacuolig erscheinenden Räumen liegen. Auch ist in Fig. 8 (bei *a*) ein blaues Körnchen aus dem todten Plasma in die umgebende Flüssigkeit gelangt.

Ist die plasmolytische Separirung der Vacuolenhaut in vielen Fällen sehr geeignet, um über die Lagerung von Körpern im Zellsaft oder im Protoplasma Aufschluss zu geben, so kann sie doch ohne weitere Controle direct zu Irrthümern führen. Denn es kommt auch vor, dass die in dem Protoplasma zerstreuten kleinen Vacuolen gleichzeitig mit diesem oder doch frühzeitiger als die Vacuolenwand absterben und flüssiger und fester Inhalt jener in die abgestorbenen Plasmareste übertritt. In der That habe ich solchen Uebertritt der in kleinen Vacuolen enthaltenen Farbkörper sowohl bei Trianea, als auch bei Faba direct beobachtet und es trat dieses besonders evident hervor, wenn die Vacuolen zugleich gelösten Farbstoff enthielten. Uebrigens habe ich auch aus solchen Vacuolen bei Trianea Kryställchen von Calciumoxalat sich den Plasmaresten einverleiben gesehen. Derartiges kann sich aber auch einstellen, wenn nicht unter dem Auge des Beobachters das Absterben von statten geht, und thatsächliche Inhaltskörper kleiner Vacuolen würden dann hiernach als

1) Vgl. die Erklärung der Figuren. Zur Operation mit Faba wurde 10 proc. Salpeterlösung verwandt, während die Isolirung in den Wurzelhaaren von Trianea besser gelang, indem nach Plasmolyse mit 5 % Salpeter (mit Eosin gefärbt) das nach kürzerem oder längerem Stehen eintretende Absterben abgewartet wurde.

Digitized by Google

dem Protoplasma eingebettete Körper erscheinen. Dass bei Eingriffen Vacuolen unter Umständen neu entstehen, mag hier nur kurz erwähnt werden, da dieses mit dem Nachweis (vgl. folgende Abhandlung), dass Vacuolen überhaupt als Neubildungen in dem Protoplasma auftreten können, nichts Auffallendes enthält. Auch an die schon erwähnte Thatsache, dass feste Partikel unter Umständen erst während der Plasmolyse in das Protoplasma übertreten, mag hier nur kurz erinnert werden. — Die mit Bezug auf die plasmolytische Isolirung der Vacuolenwand gemachte Bemerkung Went's[1]): »Es war bis vor Kurzem ganz unmöglich zu unterscheiden, ob die Stoffe, welche in der Pflanzenzelle gefunden werden, in der Vacuole oder im Protoplasma vorkommen«, kann doch wohl nicht ernstlich gemeint sein.

Abgesehen von dem Ausstossen bei plasmolytischem Absterben kommen übrigens thatsächlich in dem Protoplasma der Wurzelhaare von Trianea hier und da Krystalle von Calciumoxalat vor, und auch deren Aufnahme und Ausgabe wurde, wie später gezeigt werden soll, früher und neuerdings beobachtet. Gewöhnlich handelt es sich um kleine Krystalle, ganz vereinzelt finden sich aber auch grössere, und einen solchen Fall führt Fig. 4 (Taf. I) vor, in der nach Plasmolyse mit 5 Proc. Salpeter die Lage des Krystalles in dem noch strömenden Plasma unzweifelhaft zu erkennen ist. Oefters wurden auch Krystalle von Calciumoxalat in dem strömenden Protoplasma der Haare an Blatt und Stengel von Gesneria albiflora und vereinzelt in dem der Blattzellen von Vallisneria spiralis gefunden. Dagegen befand sich in den Haaren der Staubfäden von Tradescantia, der Blätter von Urtica dioica, Momordica elaterium, Lagenaria vulgaris, Cnicus benedictus, in den Wasserblättern von Sagittaria sagittaefolia und in Spirogyra setiformis das vorhandene Calciumoxalat nur in dem Zellsaft, obgleich in sämmtlichen Objecten Protoplasmaströmung thätig war. Indess mag auch hier wohl gelegentlich Eindringen von Krystallen in das Protoplasma stattfinden. In jedem Falle aber lehren die mitgetheilten Thatsachen, dass Calciumoxalat-Krystalle nicht allein im Zellsaft vorkommen, wie Wakker[2]) will. Wie die ganz überwiegende Lagerung dieser Krystalle und ebenso anderer Fremdkörper im Zellsaft zu erklären ist, wird erst weiterhin besprochen werden. Hier mag nur noch daran erinnert werden, dass mit dem Nachweis des Austausches fester Partikel der Ort des Vorkommens nicht nothwendig die Bildungsstätte sein muss.

Da die mitgetheilten Thatsachen genügend sicherstellen, dass in normal thätigem Protoplasma feste Partikel zwischen Zellsaft und Protoplasma ausgetauscht werden können, hatte ich keine Veranlassung derartige Versuche weiter und etwa noch auf die Einführung anderer Fremdkörper auszudehnen. Als Resultat weniger eingehender Beobachtungen sei deshalb nur noch kurz Fol-

1) Jahrb. f. wiss. Botanik 1888, Bd. 19, p. 347.

2) Jahrb. f. wiss. Botan. 1888, Bd. 19, p. 426, 491.

Digitized by Google

gendes mitgetheilt. Bei Vorhandensein von Protoplasmaströmen fanden sich einzelne Körnchen von gerbsaurem Methylenblau im Protoplasma bei Vallisneria spiralis, während der reichliche blaue Niederschlag dieser Verbindung in Spirogyra setiformis[1]) nur im Zellsaft lag, und ebenso verhielt sich die durch Methylenblau erzielte krystallinische Ausscheidung in den Blattzellen von Elodea canadensis[2]). Ferner traf ich in dem Protoplasma der Staubfadenhaare von Tradescantia virginica keine der farbigen Körnchen, welche in dem Zellsaft unter Umständen durch Wasserstoffsuperoxyd ausgeschieden werden[3]). In der Wurzel von Lemna und in den Wurzelhaaren von Azolla filiculoides, in welchen Protoplasmaströme fehlen, lagen die durch Methylenblau erzielten Niederschläge[4]) ebenfalls nur im Zellsaft.

Wie zur Aufnahme ist das Protoplasma auch zum Ausstossen fester Körper befähigt und auf diese Weise sind die in einem Augenblick im Protoplasma befindlichen Körper nach einiger Zeit vielleicht wieder sämmtlich in die Vacuolenflüssigkeit gelangt. Auf die unmittelbare Beobachtung dieses Vorganges komme ich noch zu sprechen, das Ausstossen nach aussen aus dem durch Plasmolyse contrahirten Protoplasma wurde aber schon für die Farbkörper mitgetheilt, welche in Zellen von Faba durch Einwirkung von Wasserstoffsuperoxyd entstehen (vgl. p. 165 und Taf. I, Fig. 3).

Andererseits ist aber auch ein Eindringen fester Partikel von aussen in das Protoplasma möglich und dürfte wohl als Folge mechanischen Druckes zu erzielen sein, sobald es gelingt, Fremdkörper zwischen Zellhaut und Protoplasma zu bringen, welches letztere bekanntlich durch osmotische Leistungen gegen die Zellwand gepresst wird[5]). Thatsächlich ist es mir gelungen, nach diesem Principe, also vermöge der Turgorkraft, Carminkörnchen durch die relativ ruhende Hautschicht ins Innere des Protoplasmas von Vaucheria pressen zu lassen (Fig. 1). Ferner nehmen bekanntlich zuweilen lebendige Organismen von aussen ihren Weg ins Innere fremder Zellen, ohne deshalb nothwendig das Leben des Protoplasten zu vernichten. So ist es z. B. bekannt, dass in lebendigen Zellen verschiedener sapro-

---

1) Pfeffer, Unters. a. d. bot. Institut zu Tübingen 1886, Bd. II, p. 189, 218.

2) Ebenda, p. 223.

3) Pfeffer, Oxydationsvorgänge in lebenden Zellen 1889, p. 11, 31.

4) Pfeffer, Unters. a. d. bot. Institut in Tübingen, l. c., p. 212, 213.

5) Vgl. Pfeffer, Osmotische Untersuchungen 1877, p. 161; Unters. a. d. bot. Institut in Tübingen Bd. II, p. 308.

Digitized by Google

phytischer Pflanzen (Orchideen und anderen)[1]) Pilzfäden, in den Zellen der Wurzelknöllchen von Leguminosen Bacterien[2]) sich einnisten, und Räderthierchen finden sich dann und wann in den Fäden von Vaucheria[3]).

In dem schon erwähnten Versuch mit Vaucheria geminata wurde ein kurzes Fadenstück dieser Alge in 5 proc. Rohrzuckerlösung an einem Ende gekappt und dann sogleich in 10 proc. Zuckerlösung gebracht, in der Carmin in reichlicher Menge fein zertheilt war. Bei gleichzeitiger Hin- und Herbewegung gelang es so, eine Anzahl Carminkörnchen mit dem zurückweichenden Plasmakörper ins Innere des Zellhautcylinders zu bringen. Nun wurde bei ungefähr 30—31° C. mit 10 proc. Gelatine, die 9 Proc. Rohrzucker enthielt, die Zuckerlösung mitsammt dem Ueberschuss der Carminkörnchen entfernt und durch schnelle Abkühlung die Gelatineschicht auf den Objectträger zum Erstarren gebracht. Indem nun auf die Gelatineschicht öfters erneuerte Wasserschichten gebracht wurden, begann mit dem Auswaschen des Zuckers die Turgorausdehnung des erwähnten Protoplasten, der sich gegen die Gelatine hervorwölbte, in dieser aber nach gewisser Compression eine Wiederlage fand. Zwischen beiden waren nun Carminkörnchen eingekeilt, die zumeist wohl in die Gelatine sich etwas eindrängten, doch wurde in zwei Fällen auch ein Einpressen in den Protoplasmakörper beobachtet, der an der Wundstelle in üblicher Weise relativ frei von Chorophyllkörnern war und alle Eigenschaften eines lebenden Protoplasten zeigte[4]). Einer dieser Fälle ist in Fig. 1, jedoch mit Weglassung der umhüllenden Gelatine, abgebildet. Das mit *a* bezeichnete Carminkörnchen liegt deutlich im Protoplasma, während die mit *b* bezeichneten Körnchen diesem nur anliegen. In einem anderen Falle war ein Carminkörnchen zwischen Zellhautcylinder und Protoplasma gerathen und wurde ebenfalls mit Zunahme des Turgordrucks in das Protoplasma gedrängt.

Schon mit Vaucheria, die doch verhältnissmässig gut solche Verwundungen erträgt, gelingen diese Versuche nur schwierig und bei einzelnen derartigen Versuchen mit den Haaren von Heracleum sibiricum und Symphytum caucasicum kam ich zu keinem positiven Resultate. Noch weniger eigneten sich die Internodialzellen einer unbestimmten Nitella zu solchen Operationen.

Doch wird zweifellos durch eingehendere Studien dieser Art in obiger

---

1) Vgl. Johow, Jahrb. f. wiss. Botan. 1889, Bd. 20, p. 501 und die dort citirte Literatur.

2) Beyerinck, Botan. Zeitung 1888, p. 783.

3) Frank, Krankheiten d. Pflanzen 1880, 663; vgl. auch Pfeffer, Zur Kenntniss d. Oxydationsvorgänge 1889, p. 449.

4) Vgl. Hanstein, Züge aus d. Biologie d. Protoplasmas in Bot. Abhandlung. Bd. IV, 1880, p. 46.

Digitized by Google

oder anderer Weise eine Technik auszubilden sein, die eine Einführung fester Körper in Zellen mit Zellhaut erleichtert. Erwähnt mag noch sein, dass ich ausserdem noch die Haare der obengenannten Pflanze mit 10—15 proc. Rohrzuckerlösung, die mit Asparagin oder mit Phloridzin gesättigt war, bei 32—35° C. plasmolysirte und dann schnell auf 4—5° C. abkühlte. Es schied sich allerdings nun Asparagin oder Phloridzin aus, die Krystalle entstanden aber sämmtlich ausserhalb der Zelle. Möglicherweise lassen sich auch durch chemische Umsetzungen Niederschläge zwischen Protoplasma und Zellhaut in plasmolysirten Zellen erzielen[1]).

B. Normaler Austausch ungelöster Stoffe in der lebenden Zelle.

Aufnahme und Ausgabe fester Partikel ist auch in normal lebensthätigen Zellen direct zu beobachten. Sehr geeignet sind zu diesem Zwecke die Wurzelhaare von Trianea bogotensis mit ihrem relativ mächtigen und schnell strömenden Protoplasma, in denen ich schon früher[2]) und in erneuten Versuchen den Vorgang dieses Austausches für Körnchen von gerbsaurem Methylenblau und für mittelgrosse Kryställchen von Calciumoxalat verfolgte. Im Ganzen sind die gefärbten und leichter wieder zu erkennenden Körnchen und Körnchenaggregate von gerbsaurem Methylenblau zu den Beobachtungen geeigneter, doch kann oft lange Zeit verstreichen, ehe sich einmal ein Austausch in unzweifelhafter Weise unter den Augen des Beobachters abspielt.

Die genannten Körper haften vielfach dem Protoplasma an und werden in bekannter Weise mit der strömenden Vacuolenwand am Wandbelag wie an Bändern mitgeschleppt, um dann und wann auch wieder in den Zellsaft zu fallen (vgl. p. 165). Gelegentlich dringt dann einmal ein Farbkörper oder ein Krystall während fortdauernder Bewegung durch die Vacuolenwand und das factische Eindringen wird besonders deutlich vorgeführt, wenn der Körper, bei relativ mächtiger Plasmaschicht, tiefer in diese getragen und so von der Vacuolenwand entfernt wird. Bewegungen, Form- und Lagenänderungen gestatten kaum, das allmähliche oder auch plötzliche Eindringen

1) Vgl. hierzu Pfeffer, Unters. a. d. bot. Institut in Tübingen Bd. II, p. 277, Anmerkung.

2) Unters. a. d. bot. Institut in Tübingen 1886, Bd. II, p. 188, 297.

Digitized by Google

detaillirt zu verfolgen, welches offenbar durch mechanische Druckwirkungen erzielt wird, die aus geeigneter Constellation von Bewegungen und Widerständen resultiren. So auffällige Umwallungen wie in Myxomyceten, die übrigens auch aus gleichen Ursachen entspringen, scheinen bei der Aufnahme fester Partikel in das Protoplasma von Trianea zu fehlen. Aber abgesehen davon, dass in diesen nicht, wie bei Myxomyceten, der Angriff in einem directen Marschiren gegen den Fremdkörper besteht, gestattet auch wohl die geringere Cohäsion im Plasma von Trianea keine solche weitergehende Gestaltungen, wie sie die relativ ruhende Hautschicht der Myxomyceten erfährt. Auch sah ich einige Male in kleinen Vacuolen liegende blaue Körner (vgl. Taf. I, Fig. 6) während der mit der Strömung erzielten Formänderung der Vacuolen, also ähnlich wie unter gleichen Umständen in Plasmodien, in das Protoplasma gelangen.

Aber auch Ausstossen der blauen Körner sowie von Oxalatkrystallen in den Zellsaft habe ich wiederholt beobachtet. Es spielt sich dieses analog wie die Entfernung von Fremdkörpern aus Myxomyceten ab, indem die fremden Partikel durch die Strömungen bis an die Vacuolenhaut geführt und nun offenbar mechanisch in den Zellsaft getrieben werden. Wie in Plasmodien kann dieses bei mächtigerer Plasmaschicht geschehen, aber auch dann, wenn die festen Körper in enge Plasmastränge geführt waren.

Voraussichtlich treten auch gelegentlich Fremdkörper aus dem Protoplasma in kleinere Vacuolen über, doch habe ich diesen für Plasmodien beschriebenen Vorgang im Protoplasma von Trianea nicht direct beobachtet. Das Vorkommen der festen Körper in kleinen Vacuolen ist aber natürlich auch erreichbar, indem jene direct in den Vacuolen entstehen, oder indem kleine Vacuolen durch Abtrennung von dem Zellsaft ihren Ursprung nehmen. Wie solche Abtrennung findet bekanntlich auch Verschmelzung der kleinen Vacuolen unter sich und mit der Hauptvacuole statt, und in diesem Vorgang werden natürlich mit dem Wasser und dem gelösten Stoffe die festen Inhaltskörper aus Vacuolen in den Zellsaft geführt. Es geschieht dieses also in analoger Weise wie bei Plasmodien die Entleerung der Vacuolen und ihres Inhalts in die äussere Umgebung (vgl. p. 159).

Somit ist Aufnahme und Ausgabe fester Partikel keine aus-

Digitized by Google

schliessliche Eigenschaft der Plasmodien, in denen allerdings ein solcher Austausch der ganzen Sachlage nach in ausgedehnterer und auffälligerer Weise sich ausbilden kann. Der Vorgang selbst aber ist in Plasmodien und in von Zellhaut umkleideten Plasmakörpern nach Causalität und Formalität in der Hauptsache übereinstimmend. Und ermöglicht wird in allen Fällen der Austausch durch die plastischen Eigenschaften des ganzen Protoplasten und der Plasmahaut (innere und äussere), die sich hinter dem festen Körper unmittelbar wieder schliesst. Dieserhalb wird bei solchem Durchgang kein Weg für beliebige Körper oder für diosmotischen Austausch geöffnet, sowie man ja auch eine feine Nadel durch eine Kautschukplatte oder auch durch eine Ölschicht führen kann, ohne dass damit die angrenzende Flüssigkeit einen Weg findet[1]). Natürlich ist aber ein solcher Austausch fester Partikel, der sogar von der lebendigen Bewegungsthätigkeit abhängt, kein pathologisches Phänomen, wozu es Wakker stempeln möchte[2]).

Der Austausch indifferenter Partikel ist in den umhüllten Zellen offenbar ebenso und in principiell gleichem Sinne wie bei Plasmodien von mechanischer Pressung abhängig. Wie eine solche, sofern sie ausreichend ist, auch in ruhende Plasmakörper feste Partikel befördern kann, wurde schon experimentell mit Vaucheria dargethan. Gewöhnlich hängt indess, ebenso wie in Plasmodien, Aufnahme und Ausgabe von Protoplasmaströmungen ab, und ohne solche, also in relativ ruhendem Protoplasma, scheint in der That solcher Austausch normal nicht stattzufinden. Da ausserdem bei weitem die meisten der an der Vacuolenwand adhärirenden Farbstoffpartikel und Oxalatkryställchen nicht in das Protoplasma gelangen, kann aus dem Contact mit diesen indifferenten Körpern keine auf Aufnahme entscheidend hinarbeitende Wirkung ausgehen, mag man eine solche nun in irgend einem Reiz oder in mechanischen Folgen mangelnder oder vorhandener Benetzung suchen wollen.

Dass aus den Protoplasmaströmungen auf Einnahme oder Ausgabe von Partikeln hinarbeitende Druckwirkungen entstehen können,

---

1) Vgl. Pfeffer, Physiologie I, p. 41, 45; Unters. a. d. bot. Institut in Tübingen Bd. II, p. 300, 308.

2) Jahrb. f. wiss. Botanik 1888, Bd. 19, p. 468.

Digitized by Google

ist im Allgemeinen zwar leicht zu ersehen, jedoch im einzelnen Falle schwieriger auf die näheren Constellationen zurückzuführen. Eine weitere Discussion in dieser Hinsicht hätte auch kaum eine Bedeutung und beiläufig mag nur bemerkt sein, dass in einem Falle die nöthige Druckwirkung offenbar daraus entsprang, dass ein adhärirender Körper in den spitzen Winkel zwischen zwei convergirende Plasmastränge gerieth, die in gegenseitiger Annäherung begriffen waren. Begreiflicher Weise sind Plasmabelage und Plasmastränge von zu geringer Mächtigkeit der Aufnahme eines relativ ansehnlichen Fremdkörpers nicht günstig, während dadurch, wie schon bei Myxomyceten bemerkt wurde, das Ausstossen der in dem Protoplasma vorhandenen Fremdkörper begünstigt wird. Als Resultante dieser Verhältnisse ist demgemäss bei geringer Mächtigkeit des Protoplasmas ein Auffinden fester Partikel in diesem, selbst bei lebhafter Plasmaströmung, unwahrscheinlicher. Dementsprechend schob ich auch schon früher[1]) das ausschliessliche Vorhandensein der Fremdkörper, z. B. im Zellsaft der Spirogyra, auf die verhältnissmässig geringe Mächtigkeit des Protoplasmas und die bisherigen Erfahrungen sprechen entschieden dafür, dass neben lebhafter Bewegung die Mächtigkeit der Plasmamasse die Einführung fester Partikel aus dem Zellsaft begünstigt. Natürlich kann Form und Grösse auch bei an sich indifferenten Körpern eine Rolle spielen.

C. Neigung zum Ausstossen von Fremdkörpern und Hinweise auf specielle Fälle des Austausches.

Nach der Gesammtheit der empirischen Erfahrungen überwiegt, zunächst mit Rücksicht auf indifferente feste Körper, die ausstossende Thätigkeit derart, das selbst bei vorhandener Aufnahmethätigkeit im Protoplasma sich jeweils immer nur einzelne, im Zellsaft aber die überwiegende Zahl der festen Partikel findet. Diese Anhäufung verschiebt sich aber zu Gunsten des Zellsaftes um so mehr, je mehr die Aufnahmethätigkeit irgendwie zurückgedrängt wird, und damit wird es verständlich, dass gewöhnlich geradezu die Gesammtheit solcher indifferenter Körper wie Calciumoxalat oder die genannten

1) Unters. a. d. bot. Institut zu Tübingen 1886, Bd. II, p. 189.

Digitized by Google

farbigen Ausscheidungen im Zellsaft angesammelt ist. Diese Ansammlung wird, abgesehen von anderen schon genannten Ursachen, durch ein Zurücktreten der Protoplasmaströmung augenscheinlich immer begünstigt, ebenso wie in den Plasmodien der Myxomyceten, unter sonst gleichen Umständen, mit verlangsamter Bewegung offenbar die Zahl der eingeschlossenen Fremdkörper abnimmt. Und da bei Mangel auffälliger Strömung bekanntlich immer noch Gestaltung und innerliche Lagenänderung in einem lebensthätigen Protoplasma fortdauern, so dürfte auch in einem relativ ruhenden Plasmakörper das gelegentliche Ausstossen indifferenter fester Einschlüsse fortbestehen, ohne dass die Wahrscheinlichkeit einer Einführung vorliegt. In gleichem Sinne wie den Myxomyceten dürfen wir also als Ausdruck der Erfahrungen allen Protoplasmakörpern die Tendenz zuschreiben, sich von indifferenten festen Partikeln zu befreien, und dem entsprechend verschwinden diese, wie leicht für Plasmodien zu erweisen ist, endlich ganz aus dem Protoplasma, wenn fernere Aufnahme ausgeschlossen ist.

Hinsichtlich der Causalität dieser Entleerung gelten allgemein die schon im Anschluss an die Myxomyceten angedeuteten Erwägungen (vgl. p. 157). Wir müssen es also unentschieden lassen, ob die aus den Bewegungen im Protoplasma zufällig entspringenden Constellationen (wie es wohl möglich ist) zu besagter Befreiung von festen Fremdkörpern genügen, oder ob ausserdem die Existenz dieser irgendwie Wirkungen erzielt, welche mechanische Bewegungen in eine der Entfernung förderlichen Weise anregen. Und umgekehrt muss auch die Frage auftauchen, ob nicht aus der Qualität bestimmter fester Körper Wechselwirkungen entspringen können, die deren Zurückhalten im Protoplasma erzielen. Ausser der damit erreichten Ueberwindung der Tendenz des Ausstossens (die ja bei Indifferentismus der Körper allgemein da ist) könnte vielleicht auch in concreten Fällen aus solchen specifischen Wechselwirkungen eine Begünstigung der Aufnahme bestimmter Körper hervorgehen. Im Grunde genommen handelt es sich, mit Rücksicht auf die veranlassende Wechselwirkung, um wesentlich analoge Fragen, wie sie auch hinsichtlich der von der Qualität des Stoffes und den specifischen Eigenschaften des Protoplasten abhängigen diosmotischen Aufnahme gelöster Körper zu erwägen sind, und auch für diese fordert

Digitized by Google

Zurückhalten (Anhäufung resp. Mangel von Anhäufung) jeweils eine causale Erklärung[1]).

Obige Erwägungen drängen sich aber nothwendig auf, sobald man bedenkt, dass thatsächlich kleinere und grössere geformte Bausteine des Protoplasten wie Mikrosomen, Zellkerne, Chromatophoren trotz schnellem oder langsamem Wechsel der Lage dauernd im Protoplasma verbleiben. Allerdings handelt es sich zunächst um Organe, aus deren functionellem Zusammenwirken die Leistungen des lebensthätigen Protoplasten resultiren, die also unter sich und mit dem gesammten Protoplasten in irgend welchen Wechselwirkungen stehen[2]). Indess wenn aus irgend solchen Beziehungen in allem Wechsel der räumlichen und gegenseitigen Lage der Zusammenhalt im Protoplasma[3]) und also Verhinderung des Ausstossens erreicht wird, muss auch als möglich und sogar als wahrscheinlich zugegeben werden, dass solcher Erfolg ebenfalls für fremde Körper eintreten kann, sofern aus deren Qualität entsprechende Wechselwirkungen im Protoplasma entspringen. Und thatsächlich lässt sich nicht behaupten, dass alle die im Protoplasten vorhandenen geformten Körper wirkliche Organe oder mit einem Organe verkettete Körper vorstellen[4]). Jedenfalls kann auf Organ-Natur weder aus solchem Verbleib im Protoplasma, noch aus dauernder Existenz geschlossen werden, da ja thatsächlich mancherlei einfache Stoffwechselproducte an dem Orte ihrer Ablagerung dauernd verharren.

Die eben discutirten Fragen wurden bisher noch nicht in präciser

---

1) Vgl. Pfeffer, Unters. a. d. botan. Institut zu Tübingen Bd. II, p. 301, 304; Physiologie Bd. II, p. 44.

2) Im allgemeinsten Rahmen ist auch an das Abstossen unbefruchteter Blüthen und an analoge Fälle zu erinnern, in welchen das Abwerfen eine Folge des Fehlens der normalen Thätigkeit ist.

3) Vgl. Pfeffer, Zur Kenntniss der Oxydationsvorgänge in lebenden Zellen 1889, p. 86.

4) Dahin gehören z. B. die schon (p. 157) erwähnten Körnchen von Calciumcarbonat, deren energisches Ausstossen wenigstens anscheinend erst mit Aufgabe des beweglichen Plasmodiumzustandes beginnt. Auch verharren im Protoplasten anderer Pflanzen augenscheinlich öfters Öltropfen. — Sicherlich wird geringe Grösse wohl allgemein begünstigend für den Verbleib im Protoplasma sein, doch müssen noch andere Momente mitspielen, da z. B. die Zellkerne oder die Chlorophyllkörner oft die Grösse der ausgestossenen Fremdkörper übertreffen.

Digitized by Google

Form aufgeworfen und so fehlt es begreiflicher Weise an Untersuchungen, die eine bestimmte Einsicht gestatten. Übrigens dürften die Plasmodien von Myxomyceten wohl am besten zur Prüfung gewisser einfacher Verhältnisse aus naheliegenden Gründen geeignet sein.

Lassen auch immerhin verschiedene Erfahrungen Wechselwirkungen der besprochenen Art vermuthen, so würde doch bei der derzeitigen Sachlage eine weitere Discussion zu keinem sicheren Resultate führen. So mag hier nur noch daran erinnert werden, dass z. B. in manchen Infusorien aufgenommene kleine Algen in symbiotischer Vereinigung (also analog wie die ja auch autonomen Chlorophyllkörper in den zugehörigen Pflanzen) verharren, während das Plasmodium von Chondrioderma eingeführte kleine Algen und ebenso auch die Chlorophyllkörper von Funaria wieder auszustossen pflegt. Natürlich gehört in den Rahmen der hier aufgeworfenen Fragen auch die Aufhellung der Ursachen, welche in sexuellen und asexuellen Vorgängen die Ausstossung bestimmter Plasmatheile oder die Vereinigung von Protoplasmakörpern, resp. die Verhütung von Verschmelzungen bedingen. Bezüglich der Myxomyceten wurde schon darauf hingewiesen, dass wohl die Plasmodien derselben Art, nicht aber die verschiedener Arten miteinander verschmelzen.

Die Kenntniss des Vorganges und der Bedingungen beim Austausch indifferenter fester Körper ist jedenfalls als Grundlage nothwendig, um in die Verhältnisse forschend eindringen zu können, welche im Dienste des Organismus zu besonderen Vorgängen und Leistungen führen. Übrigens erscheint schon das Ausstossen von Fremdkörpern als eine zweckentsprechende Einrichtung, um das Protoplasma von unnützem fremden Ballast zu befreien, und in gegebenen Fällen mag wohl auch die Überführung in das Protoplasma oder in den Zellsaft dazu dienen, um Körper (ebenso auch gelöste) Umsetzungen zu entziehen oder zu unterwerfen[1]. Aus der Thatsache des Austausches folgt selbstverständlich, dass der Ort des Vorkommens räumlich getrennt von dem der Bildung (analog wie bei gelösten Stoffen) liegen kann. Es bedarf also in jedem Falle besonderer Studien oder Anhaltepunkte, um zu entscheiden, ob ein

---

1) Vgl. Pfeffer, Oxydationsvorgänge, l. c., p. 83.

Digitized by Google

etwa im Zellsaft angetroffener Körper auch in diesem seine Entstehung nahm.

Kann es bei der derzeitigen Sachlage auch nicht unsere Aufgabe sein, bekannte Thatsachen unter obigen Gesichtspunkten einer näheren Discussion zu unterziehen, so dürfte es doch geboten sein, wenigstens einige bezügliche Beobachtungen hier kurz anzudeuten.

Abgestorbene Plasmamassen scheinen, wie aus Plasmodien (p. 157), auch aus anderen Protoplasmakörpern ausgestossen zu werden. Wenigstens sprechen dafür Erfahrungen über die Wirkung von Bismarckbraun auf die Wurzelhaare von Trianea. Bei richtig geleiteter Einwirkung werden nämlich local gewisse Plasmaportionen desorganisirt und dann mit der Zeit aus dem fortströmenden Protoplasma in den Zellsaft ausgestossen [1].

Um solche Ausstossung zu veranlassen, dürfte aber weitgehende Desorganisation des Protoplasmas nothwendig sein. Dem entsprechend scheint es nach Pringsheim [2] in Nitella zu keinem Uebergang in den Zellsaft zu führen, wenn durch intensives Licht die Chlorophyllkörper entfärbt und nun in der Protoplasmaströmung mit fortbewegt werden. Ebenso scheint eine Verwandlung von Chlorophyllkörpern in andere Chromatophoren eine Ausstossung aus dem Protoplasma nicht nothwendig zur Folge zu haben.

Mehr oder weniger gehört wohl auch hierher die Ausstossung oder auch Abtrennung der sich im Zellsaft häufig vacuolisirenden Plasmaportionen, wie solche durch Einwirkung von Methylviolett und Fuchsin [3], ferner in theilweise ähnlicher Weise durch Ammoniak, Temperaturextreme, elektrische Entladungen und andere Einwirkungen [4] erreichbar ist. Diese Vorgänge hängen übrigens mit Entstehung und Verschmelzung von Vacuolen zusammen, die an dieser Stelle nicht näher zu behandeln sind. Es mag deshalb nur an die Thatsache erinnert werden, dass Vacuolen mit heterogenem Inhalt nicht immer mit einander verschmelzen und dem entsprechend auch in den Zellsaft Farbstoff oder Gerbsäure [5] enthaltende Vacuolen sich separirt erhalten können. Nach den Beobachtungen von Klebs [6] werden übrigens in Zygnema Gerbsäurebläschen bei entsprechender Einwirkung von Methylviolett aus dem Protoplasma nach aussen, also gegen die Zellwand hin, ausgestossen.

Stärkekörner. Diese liegen bei ihrer Entstehung jedenfalls im Protoplasma und so lange sie mit den Stärkebildnern (einschliesslich der Chlorophyllkörper) verkettet sind, ist wohl an einen Übertritt in den Zellsaft nicht

1) Pfeffer, Unters. a. d. bot. Institut in Tübingen Bd. II, p. 262.
2) Jahrb. f. wiss. Botan. 1879-81, Bd. XII, p. 333.
3) Pfeffer, l. c., p. 250, 255, 264.
4) Vgl. Pfeffer, Physiologie Bd. II, p. 386 ff.
5) Klercker, Studien über die Gerbstoffvacuolen 1888, p. 45.
6) Unters. a. d. bot. Institut zu Tübingen 1886, Bd. II, p. 376.

Digitized by Google

zu denken. Ob aber etwa ein Losreissen von den Stärkebildnern und damit ein Ausstossen aus dem Protoplasma vorkommt, ist bisher nicht kritisch untersucht. Auf frühere Angaben über Vorkommen von Stärkekörnern im Zellsaft [1]) ist um so weniger Gewicht zu legen, als leicht der Anschein solcher Einbettung erreicht wird, wenn die Körner mit dünner Plasmaschicht überzogen in den Zellsaft vorspringen. Uebrigens werden im Plasmodium Stärkekörner wie andere indifferente Körper aufgenommen und ausgestossen.

Krystalloide. Proteïnkrystalle sind in Zellkern, Chromatophoren, Cytoplasma und Zellsaft beobachtet worden [2]). Zwischen Zellsaft und Cytoplasma soll nach van Tieghem [3]) ein Austausch von Krystalloiden stattfinden. Ein solcher ist für Zellkern und Chromatophoren noch nicht beobachtet und es bleibt (ebenso wie für Stärkekörner) noch fraglich, ob diese geformten Körper aus den genannten Organen gelegentlich ausgestossen werden.

Calciumoxalat. Wie schon besprochen wurde, liegen diese Krystalle gewöhnlich im Zellsaft, können indess auch in das Protoplasma aufgenommen werden. Demgemäss entscheidet die einfache Constatirung des Fundorts nicht unbedingt über den Ort der Entstehung. Die Oxalsäure wenigstens dürfte wohl zumeist (vielleicht stets) in den im Protoplasma sich abspielenden Processen ihren Ursprung nehmen und dann von hier nach aussen, wie bei Peziza sclerotiorum [4]) und anderen Pflanzen, oder in die Vacuolenflüssigkeit secernirt werden. Mag nun für gewöhnlich in letzterer erst das Calciumoxalat entstehen, so ist damit doch möglich, dass in anderen Fällen schon innerhalb des Protoplasmas das Zusammentreffen mit Kalksalzen eintritt.

Ausser den schon mitgetheilten directen Beobachtungen sprechen übrigens noch einige andere Thatsachen für gelegentliche Einbettung von Calciumoxalat in das Protoplasma [5]). So die häufige Umhüllung von Krystallen dieses Stoffes mit einem Cellulosehäutchen [6]) und die sich anschliessende Bildung der Rosanoff'schen Drusen [7]). Für die Fähigkeit des lebenden Protoplasten, in sich Krystalle eindringen zu lassen, theilt Wakker, der, wie bemerkt, das Vorkommen von Calciumoxalat im Protoplasma ganz leugnet, selbst ein Beispiel mit, indem er beobachtete, dass bei Anthurium Hookeri in Folge plas-

1) Vgl. Hofmeister, Pflanzenzelle 1867, p. 381, Pfeffer, Physiol. II, p. 41.

2) Lit. vgl. Zimmermann, Morphologie u. Physiologie d. Pflanzenzelle 1887, p. 63—80; Leitgeb, Mittheil. a. d. botan. Institut in Graz 1888, Heft 2, p. 113; Wakker, Jahrb. f. wiss. Bot. 1888, Bd. 19, p. 467.

3) Annal. d. scienc. naturell. 1875, VI. sér., Bd. I, p. 25.

4) Vgl. de Bary, Bot. Zeitung 1886, p. 403; Morphol. u. Biologie d. Pilze 1884, p. 11.

5) Vgl. auch Kohl, Kalksalze u. Kieselsäure i. d. Pflanze 1889, p. 38.

6) Vgl. Kohl, l. c., p. 38, 89.

7) Kohl, l. c., p. 32, 82. Hier werden auch die Angaben Wakker's über die Entstehung dieser Drusen widerlegt.

Digitized by Google

molytischer Zusammenziehung sich einzelne Raphiden durch das Protoplasma bohrten[1]). Ein solches Durchbohren des Protoplasmas und selbst der Zellwand wurde übrigens als eine Folge vom Wachsthumsvorgängen schon von Vöchting[2]) und anderen Forschern[3]) angenommen. Eine Spedirung von Oxalat durch den Protoplasmakörper muss auch bei Citrus stattfinden, um den zunächst im Zellsaft liegenden Krystall an die Zellwand zu befördern, wo er dann durch Ausscheidung von Cellulose der Zellwand eingebettet wird[4]).

Öl, Wachs, Harz. Für diese Stoffe, die bekanntlich zum Theil als Excrete sich verhalten, herrscht weder über den Bildungsort, noch über etwaigen Austausch derselben genügende Klarheit. Die nachgewiesene Fähigkeit der Plasmodien, grössere und kleinere Öltropfen leicht aufzunehmen und auszugeben, muss es übrigens wahrscheinlich machen, dass solcher Austausch auch in anderen Zellen stattfinden kann.

Für Wachs wurde durch de Bary[5]) wahrscheinlich gemacht, dass es durch Secretion in die Cuticula gelangt. Auf solche Weise dürften auch, ausser durch Metamorphose der Zellhaut, fett- und harzartige Stoffe in Drüsenhaaren nach aussen gelangen[6]). Auch sprechen Beobachtungen dafür, dass die Harzgänge wenigstens einen Theil ihres Inhaltes durch Secretion von Balsam aus angrenzenden Zellen zugeführt erhalten[7]).

Mögen fette Öle, wie es scheint, im Protoplasma ihren Ursprung nehmen[8]), in welchem sie vielleicht nie ganz fehlen, so ist doch gelegentliche Ausscheidung aus jenem kaum zu bezweifeln. Sofern der Milchsaft dem Zellsaft entsprechen sollte[9]), müssen, Entstehung im Protoplasma vorausgesetzt, aus

1) Wakker, l. c., p. 440.

2) Histologie u. Entwicklungsgeschichte von Myriophyllum 1872, p. 14. (Separat. aus Nova acta etc. Bd. 36.)

3) Vgl. Kohl, l. c., p. 93, 164.

4) Pfitzer, Flora 1872, p. 118; Wakker, l. c., p. 432; Kohl, l. c., p. 88. — Auf solche Weise gelangen aber keineswegs alle Oxalatkrystalle in die Zellwand, wie es meist angenommen zu werden scheint (vgl. auch Kohl, l. c., p. 71). In der Epidermis der Blätter von Sempervivum tectorum und calcareum, sowie in den Zweigen von Taxus baccata konnte ich leicht feststellen, dass die Kryställchen innerhalb der Zellhaut und theilweise in weitem Abstand vom Protoplasma entstehen und auf ihre endliche Grösse heranwachsen.

5) Vergleichende Anatomie 1877, p. 92.

6) Behrens, Bericht d. Botan. Gesellschaft 1886, p. 400. Ähnliche Angaben schon bei Hanstein. Vgl. dazu de Bary, l. c., p. 98.

7) Berthold, Protoplasmamechanik 1886, p. 27.

8) Hofmeister, Pflanzenzelle 1867, p. 2; Borodin, Botan. Zeitung 1878, p. 548 (für Vaucheria); Wakker, Jahrb. f. wiss. Botanik 1888, Bd. 19, p. 475 ff.

9) Vgl. übrigens Berthold, l. c., p. 30.

Digitized by Google

diesem die Öltropfen ausgeschieden werden. Ob das fette Öl in der Stoffwanderung als solches seinen Weg von Zelle zu Zelle nehmen kann, ist wohl möglich, doch nicht erwiesen[1]). Uebrigens ist zu beachten, dass ein Öltropfen gleichsam wie eine Vacuole in dem Protoplasma liegt und ein Hinzufügen von Öl ebenso gut eine Ausscheidung aus dem Protoplasma bedeutet, wie die Ueberführung von festen oder flüssigen Stoffen in Vacuolen. Und im gleichen Sinne wie solche oder wie auch feste Körper in den Zellsaft übertreten können, ist auch z. B. der Uebergang von Ölkörpern der Lebermoose in den Zellsaft aufzufassen. Am Wesen der Sache ändert es nichts, wenn dabei um Ölmassen, oder ebenso um Krystalle ein plasmatisches oder wenigstens aus Proteïnstoffen bestehendes Hüllhäutchen verbleibt[2]).

1) Vgl. Pfeffer, Physiologie Bd. I, p. 336; Unters. a. d. bot. Institut zu Tübingen Bd. II, p. 308. — Inzwischen wurde in meinem Institute durch Herrn R. H. Schmidt nachgewiesen, dass Schimmelpilze direct durch Öl und Ölsäure ernährt werden können. Ferner wurde constatirt, dass Ölsäure durch die Zellhaut in lebendige Protoplasten gelangen kann, die anscheinend emulgirend wirken, während solche Wirkung in den bisherigen Versuchen für Plasmodien nicht hervortrat.

2) Die Frage über Entstehungsort und Übertritt von Öl bedarf erneuter Untersuchung. Wakker (l. c.) hat die Frage nicht in ihrem Umfange und ihrer Bedeutung aufgefasst und seine Beobachtungen sind schon deshalb unzureichend, weil Fundort und Bildungsort, unter Annahme eines mangelnden Austausches ungelöster Körper zwischen Protoplasma und Zellsaft, identificirt werden. Auch ist wohl nur unter dem Einfluss der Annahme der Autonomie der Vacuolenwand die jedenfalls unzulässige Auffassung entstanden, dass bei Umhüllung mit irgend einem proteïnstoffhaltigen Häutchen eine Körpermasse noch als in dem Protoplasma eingebettet anzusehen sei. Dann wären ebenso bei oft gleicher Umhüllung die im Zellsaft liegenden Oxalatkrystalle consequenterweise als Inhaltskörper des Protoplasmas anzusprechen. — An dieser Stelle mögen auch einige Worte über die Proteïnkörner Platz finden, da in der bezüglichen Darstellung Wakker zu übersehen scheint, dass er die Eiweissstoffe ebensowohl, wie ich es annahm, in Vacuolenflüssigkeit sich ansammeln lässt, und seine Annahme erst darin differirt, dass er die Vacuolen als formbildende Räume schon vor den Proteïnkörnern da sein lässt, während ich eine nachträgliche Separation des in grösseren Vacuolen gesammelten Inhalts supponirte, bei welcher übrigens die Plasmabänder in die proteïnstoffreiche Zwischenmasse einzutreten haben. Es ist übrigens möglich, dass Wakker Recht hat, oder dass auch beides vorkommt, und so sich die wieder in meinem früheren Sinne lautenden Resultate von Lüdtke (Jahrb. f. wiss. Bot. 1889, Bd. 21, p. 62) erklären. Ein Irrthum meinerseits wäre verzeihlich, da zur Zeit jener Untersuchungen die heutigen technischen Fixirmethoden noch nicht ausgebildet waren und auch die zu Grunde zu legenden Vorstellungen über den Protoplasmakörper und die umschlossenen Organe die heutige präcisere Form noch nicht angenommen hatten.

Digitized by Google

IV. Zusammenfassung einiger Resultate.

Das Plasmodium vermag ebenso indifferente als auch zur Ernährung nutzbare, ungelöste Fremdkörper aufzunehmen und u. a. auch Öltropfen sowie lebende Organismen zu verschlucken. Ferner werden auch lösliche Körper in gesättigter Lösung verschlungen, sofern diese nicht die Bewegungsthätigkeit zu sehr beeinträchtigt.

Die aufgenommenen Fremdkörper bleiben entweder dem Protoplasma eingebettet oder gelangen in Vacuolen, aus welchen sie auch umgekehrt in das Protoplasma des Plasmodiums zurücktreten können.

Beim Ausstossen treten die Fremdkörper entweder direct aus dem Protoplasma des Plasmodiums nach aussen oder werden durch Einreissen der an die Peripherie gelangten umschliessenden Vacuole mitsammt der Vacuolenflüssigkeit entleert.

Aufnahme und Ausgabe werden durch die active Bewegungsthätigkeit des Plasmodiums und den Widerstand der Fremdkörper erzielt. Mit der fortschreitenden Bewegung des Plasmodiums erlischt deshalb im Allgemeinen die Aufnahmethätigkeit, während das Ausstossen in den auf Abrundung zielenden Formänderungen noch fortdauern kann.

Solche mechanische Durchpressung ungelöster Körper wird durch die plastische Beschaffenheit des Protoplasmas ermöglicht, welches immer sofort hinter dem passirenden Körper zusammenschliesst und mit solchem Durchgang also keinen Weg für gelöste Stoffe eröffnet.

Vermöge solcher plastischen Beschaffenheit sind auch die von Zellhaut umschlossenen Protoplasten zur Aufnahme und Ausgabe ungelöster Körper befähigt, und thatsächlich kann auch in diesen Zellen solcher Austausch durch die geeigneten mechanischen Bedingungen erzielt werden. Da aber z. B. eine geeignete Bewegungsthätigkeit öfters fehlt und ferner z. B. der Aufnahme und dem Verweilen von Fremdkörpern im Protoplasma eine geringe Mächtigkeit dieses letzteren ungünstig ist, spielt sich nicht in allen Zellen ein solcher Austausch in merklicher Weise ab.

Aus solchen Erwägungen ist auch zu verstehen, warum in den hautumkleideten Zellen die festen Körper gewöhnlich im Zellsaft liegen und sich in diesem selbst dann befinden, wenn sie dereinst

Digitized by Google

dem Protoplasma eingebettet waren. Übrigens befreien sich auch die Plasmodien sachgemäss von Fremdkörpern, wenn aus irgend welchen Ursachen die Aufnahmethätigkeit zurücktritt.

Ob und in wie weit der Austausch ungelöster Körper bestimmten Functionen und Zwecken im Organismus dienstbar gemacht ist, wird von Fall zu Fall entschieden werden müssen. Jedenfalls aber muss mit der Realität des Austausches ein im Zellsaft vorhandener fester Körper nicht nothwendig in diesem entstanden sein.

Scheint beim Austausch ungelöster indifferenter Körper eine Reizwirkung nicht nothwendig, so dürften doch in anderen Fällen bestimmte Wechselwirkungen im Spiele sein, welche ja z. B. auch nothwendig sind, um in allem Wechsel dennoch den Zusammenhalt der differenzirten Organe mit und in den Protoplasten zu erhalten.

Digitized by Google

Erklärung der Abbildungen.

Tafel I.

Fig. 1. Vaucheria geminata (Vauch.). Vgl. den Text p. 169. Der Protoplasmakörper war innerhalb des Schlauchs durch die Plasmolyse in zwei Partien separirt worden (250/1).

Fig. 2. Epidermiszellen aus dem Keimstengel von Vicia faba, nach der Behandlung mit Wasserstoffsuperoxyd (p. 166) plötzlich mit 10proc. Salpeterlösung behandelt. In dem abgestorbenen Protoplasma finden sich einzelne farbige Körper, die meisten sind aber in den in zwei Vacuolen separirten Zellsaft neben etwas gelöstem Farbstoff enthalten und haben sich, der Schwere folgend, zusammengehäuft (520/1).

Fig. 3. Stück einer Epidermiszelle des Keimstengels von Vicia faba. Nach Behandlung mit Wasserstoffsuperoxyd allmählich durch 8proc. Salpeterlösung contrahirt, enthält das noch strömende Protoplasma farbige Körnchen in sich, während einige nach aussen ausgestossen wurden (p. 165) (1000/1).

Fig. 4. Wurzelhaar von Trianea bogotensis nach langsamer Plasmolyse mit 5 % Salpeter. In dem noch strömenden Plasma liegt bei *a* ein ansehnlicher Krystall von Calciumoxalat (250/1).

Fig. 5. Zelle aus der Wurzelhaube von Hydrocharis morsus ranae. Nachdem die Wurzel 18 Stunden in 0,0002proc. Methylenblau verweilt hatte, wurde ein Stück Wurzelhaube mit 5 % Salpeter behandelt, bei *a* liegen blaue Körnchen im Protoplasma (350/1).

Fig. 6, 7, 8 beziehen sich auf Wurzelhaare von Trianea bogotensis, die zunächst 1 bis 5 Stunden in 0,001proc. Methylenblau verweilt hatten (350/1).

Fig. 6. Nach langsamer Plasmolyse mit 5 % Salpeter. In dem strömenden Plasma liegen bei *a* blaue Körnchen. Bei *b* sind solche in kleinen Vacuolen enthalten.

Fig. 7 und 8. Ein bis zwei Stunden nach Einbringen in 5 % Salpeter (mit Eosin gefärbt) ist das Protoplasma bis auf die Vacuolenhaut abgestorben. Blaue Körnchen liegen bei *a* (Fig. 8) ausserhalb des Protoplasmas, bei *b* im todten Plasma und bei *c* in vacuolenartigen Räumen. Die rothe Färbung des Plasmas ist nicht gezeichnet.

Digitized by Google

Inhaltsübersicht.

		Seite
I.	Einleitung	149
II.	Versuche mit dem Plasmodium der Myxomyceten	150
	A. Aufnahme von Fremdkörpern	150
	B. Ausstossung von Fremdkörpern	156
III.	Zellen und Zellhaut	162
	A. Fähigkeit zum Austausch ungelöster Körper	162
	B. Normaler Austausch ungelöster Körper in der lebenden Zelle	170
	C. Neigung zum Ausstossen von Fremdkörpern und Hinweise auf specielle Fälle	173
IV.	Zusammenfassung einiger Resultate	181
	Erklärung der Abbildungen	183

Digitized by Google

ZUR KENNTNISS

DER

PLASMAHAUT UND DER VACUOLEN

NEBST BEMERKUNGEN

ÜBER DEN

AGGREGATZUSTAND DES PROTOPLASMAS

UND ÜBER

OSMOTISCHE VORGÄNGE

VON

Dr. W. PFEFFER.

MIT TAFEL II UND 1 HOLZSCHNITT.

Digitized by Google

I. Einleitung.

Als ich in früheren Studien[1]) Existenz und functionelle Bedeutung der Plasmahaut behandelte, war dieses, wie auch betont wurde, möglich, ohne dass in die Entstehung der Plasmahaut eine völlige Einsicht gewonnen war. In genetischer Hinsicht hielt ich übrigens die Plasmahaut für ein Differenzirungsproduct aus der Leibessubstanz des Cytoplasmas, das sich an der ganzen Oberfläche mit einer Schicht besonderer Qualität, der Plasmahaut, umkleidet. Die Plasmahaut ist demgemäss stets und continuirlich als Abgrenzung sowohl gegen die Vacuolen, als gegen die Zellhaut als ein selbst plastisches und lebendiges Organ des lebenden Protoplasmakörpers vorhanden, weil sie in und mit der freien Oberfläche die Bedingungen für ihre Entstehung und Erhaltung findet, so dass also die Baumaterialien mit der Entfernung von der Grenze sich wieder im Protoplasma vertheilen.

Im Gegensatz zu solcher heterogener Entstehung trat späterhin de Vries[2]) für Autonomie der Plasmahaut ein, die nach der Ansicht dieses Forschers homogenen Ursprungs ist, d. h. analog wie Zellkern und Chromatophoren immer aus ihresgleichen entsteht, also nur durch Descendenz erhalten und überliefert wird, durch Neubildung aber aus dem Cytoplasma nicht hervorgebracht werden kann. Zwar sind, wie die spätere Kritik lehren wird, genügende Argumente für solche Auffassung weder von de Vries, noch von Anderen erbracht

1) Osmotische Untersuchungen 1877, p. 121; vgl. Physiologie 1881, Bd. I, p. 31, 43; Unters. a. d. bot. Institut zu Tübingen 1886, Bd. II, p. 315.

2) Jahrb. f. wiss. Botanik 1885, Bd. XVI, 465; Intracellulare Pangenesis 1889, p. 126, 150 u. s. w.

Digitized by Google

worden, doch lässt sich ein durchgreifender Gegenbeweis nicht aus den bisherigen Erfahrungen ableiten, wenn sie auch im Allgemeinen gegen solche Autonomie und für heterogenen Ursprung der Plasmahaut zu sprechen scheinen[1]. Durch die in Folgendem mitzutheilenden Untersuchungen wird aber zunächst für das Plasmodium der Schleimpilze die heterogene Entstehung der Plasmahaut streng bewiesen. An analoger Genesis in anderen Zellen wird hiernach wohl nicht mehr gezweifelt werden, da einmal ein abweichendes Verhalten in einem so allgemeinen und fundamentalen Vorgang allen bisherigen Erfahrungen über die einheitlichen Eigenschaften der verschiedenen Arten der Protoplasmaorganismen widersprechen würde und auch die objective Interpretation aller thatsächlichen Beobachtungen an anderen Pflanzen entschieden auf gleichen Ursprung der Plasmahaut, wie in den Myxomyceten hinweist. Sachgemäss werden in Folgendem zunächst die Myxomyceten und erst dann andere Pflanzen behandelt werden. Im voraus mag immerhin schon darauf aufmerksam gemacht werden, dass mit der bezeichneten heterogenen Genesis der Plasmahaut natürlich alle die Schlussfolgerungen fallen, welche auf die Autonomie dieser und also auch auf die Autonomie der Vacuolen gebaut sind. Da äussere und innere Plasmahaut (Vacuolenwand) aus gleichem Substrate enspringen, so sind beide nur relativ, zunächst der räumlichen Lage nach, verschieden und können auch thatsächlich in einander übergehen. Es sind also auch nicht Hautschicht und Vacuolenwand, wie es wenigstens in jüngeren Arbeiten de Vries[2] anzunehmen scheint, zwei Organe, von denen jedes selbständig und autonom sich erhält. Ebenso verlieren die Tonoplasten als autonome Organe ihre Berechtigung.

Bei solcher Übereinstimmung ist jedenfalls eine allgemeine, von der Lage unabhängige Bezeichnung für die fragliche Oberflächenschicht des Protoplasmas vortheilhaft und in diesem allgemeinen Sinne werde ich Plasmahaut oder Plasmamembran anwenden, während fernerhin mit Hautschicht oder Hyaloplasmahäutchen die äussere Plasmahaut,

1) Vgl. Pfeffer, Unters. a. d. bot. Institut in Tübingen I. c., p. 322; Botan. Zeitung 1886, p. 114.

2) Intracellulare Pangenesis 1889, p. 156.

Digitized by Google

mit Vacuolenhaut oder Vacuolenwand, im Anschluss an de Vries, die innere Plasmahaut bezeichnet werden soll[1]). Unter Protoplasmakörper, Protoplasmaorganismus, Protoplast und schlechthin Protoplasma oder Plasma verstehe ich, wie früher[2]), den ganzen lebendigen Elementarorganismus in der Zelle, mit Einschluss aller seiner differenzirten Organe und Bausteine und es kann keine Zweideutigkeit des Begriffes dadurch entstehen, dass zur Zeit nicht immer genau zu sagen ist, was von geformten und gelösten Stoffen am Aufbau selbst betheiligt oder fremde Einlagerung ist. Als an sich nicht lebende, aber von Protoplasma umschlossene Theile der Zelle sind auch die in besagter Weise abgegrenzten wässerigen Lösungen zu nennen, welche allgemein Vacuolen und bei relativ grossem Volumen Zellsaft genannt werden[3]). Mit einer Vacuole ist aber die Existenz der zum Protoplasma gehörigen Plasmahaut vorausgesetzt und wenn diese, mitsammt der umschlossenen Vacuolenflüssigkeit gelegentlich vom Protoplasma ausgestossen wird, so will das doch im Princip nichts anderes bedeuten, als eine auch in vielen anderen Fällen vorkommende Abtrennung von Theilen des Protoplasmakörpers.

Wenn von Hyaloplasma (Pfeffer) im Gegensatz zu Körnerplasma (Strasburger) oder Polioplasma (Nägeli) die Rede ist, soll damit nur eine sichtbare Differenzirung angezeigt sein[4]), während thatsächlich das Körnerplasma nur durch irgend welche Einlagerungen getrübtes

---

1) Die angeführten Bezeichnungen (abgesehen von der Vacuolenhaut) wandte ich früher unabhängig von der Lage für jede Oberflächenhaut des Protoplasmas an. Es scheint mir aber zweckmässig, durch Specialisirung der Begriffe in der im Text angegebenen Weise, eine einfache, auch die äussere Plasmahaut kennzeichnende Bezeichnung zu gewinnen. Übrigens schliesst sich diese Einschränkung insofern der historischen Entwicklung an, als Pringsheim (1854) unter Hautschicht nur die äussere Plasmahaut verstand und Hyaloplasma zunächst an der Aussenfläche der Protoplasten beobachtet wurde. (Vgl. auch Unters. a. d. bot. Institut zu Tübingen Bd. II, p. 181.)

2) Vgl. Unters. a. d. bot. Institut in Tübingen l. c., p. 181; auch Berthold, Protoplasmamechanik 1886, p. 79. — Mit Cytoplasma, Nucleoplasma sind, wo es nöthig, Bezeichnungen für einzelne Theile geboten.

3) Vgl. auch Pfeffer, Zur Kenntniss der Oxydationsvorgänge 1889, p. 83.

4) Bei auffälliger Differenzirung, wie in Plasmodien, kann man, ebenso wie bei Protozoen, auch wohl Ectoplasma und Entoplasma unterscheiden. Vgl. Bütschli, Protozoa 1889, p. 116.

Digitized by Google

Hyaloplasma vorstellt, das öfters eben nur in oberflächlichen Schichten relativ ungetrübt uns entgegentritt. Dass diese Trübung in verschiedener Weise, z. B. durch Öltropfen, kleine Vacuolen, sowie durch andere Partikel erzielt werden kann, mag noch kurz angedeutet sein, ebenso dass unter Mikrosomen alle die wohl recht verschiedenen Körnchen zusammengefasst werden, welche vorläufig nicht näher nach Qualität und Bedeutung zu präcisiren sind und unter denen natürlich auch oft Fremdkörper sich befinden[1]).

II. Beobachtungen an dem Plasmodium der Myxomyceten.

A. Allgemeines.

An den Plasmodien lässt sich sowohl für Hautschicht als Vacuolenhaut eine Neubildung aus dem Cytoplasma sicher erweisen. Eine solche Neubildung von Hautschicht konnte direct an Schnittflächen durch Plasmodienstränge verfolgt werden (vgl. Taf. II, Fig. 4), während eine Erzeugung von Vacuolen, und damit von Vacuolenwand, gelang, indem ich die Plasmodien zunächst feste Partikel löslicher Stoffe in gesättigter Lösung aufnehmen liess und dann durch Auswaschen mit Wasser eine partielle Lösung des eingeführten Fremdkörpers einleitete (vgl. Fig. 1, 2, 5, 6). Abgesehen davon, dass mit der Entstehung aus Cytoplasma gleicher Ursprung für Hautschicht und Vacuolenhaut nachgewiesen ist, kommt es gelegentlich vor, dass die Hautschicht mit angrenzender Flüssigkeit ins Innere des Plasmodiums gedrängt und so direct zur Vacuolenhaut wird.

Vor dem Eingehen auf diese Versuche dürfte es geboten sein, wenigstens einige Worte über den Aufbau des Plasmodiums vorauszuschicken. Auch sei ein für allemal bemerkt, dass alle meine Beobachtungen, so weit nicht anderes gesagt ist, an den Plasmodien von Chondrioderma difforme angestellt wurden, dessen Cultur und Herrichtung zu Versuchen früher[2]) besprochen wurde.

---

1) Vgl. Pfeffer, Zur Kenntniss d. Oxydationsvorgänge 1889, p. 89; Tübing. Unters. I. c., p. 181. Über Fremdkörper in Plasmodien; vgl. auch die vorige Abhandlung p. 157.

2) Vgl. die vorige Abhandlung p. 154.

Digitized by Google

Die trüben Plasmodien der Schleimpilze sind bekanntlich mit kaum wahrnehmbarem oder auch mit mächtigerem Hyaloplasma umkleidet, das ich gelegentlich bis zu einer Dicke von 0,008 mm ausgebildet fand (vgl. Fig. 7). Die Mächtigkeit des Hyaloplasmas ist aber dauerndem und oft schnellem Wechsel unterworfen, indem durch Einwandern von Körnchen die Hyaloplasmaschicht vermindert oder umgekehrt durch Auswandern von Körnchen vermehrt wird. So besteht keine bestimmte Abgrenzung zwischen Hyaloplasma und Körnerplasma, und thatsächlich ist letzteres nur als Hyaloplasma anzusehen, das durch eingelagerte Körper getrübt ist[1]). Diese Trübung ist in dem Plasmodium immer vorhanden, jedoch in sehr verschiedenem Grade und in dünnen Strängen können die Körner ganz oder fast ganz zurücktreten, so dass Plasmodienäste bis zu 0,02 mm Dicke vorkommen, die fast nur aus Hyaloplasma bestehen, in nächster Zeit aber wieder durch Einwanderung von Körnchen getrübt werden können (vgl. Fig. 5). Die Frage nach Natur und Bedeutung dieser sicherlich qualitativ ungleichwerthigen Körnchen müssen wir hier unberührt lassen. Zweifellos sind die Körnchen theilweise Fremdkörper, in bestimmten Fällen wohl auch Calciumcarbonat[2]), doch ist damit nicht ausgeschlossen, dass andere Körnchen Organe oder Bausteine des Protoplasten vorstellen, und dieses ist immer noch möglich, wenn auch die Plasmodien körnchenfreie Partien bilden und in den Myxamöben die Körnchen gänzlich fehlen können.

Ein Wechsel in der Mächtigkeit des Hyaloplasmas fordert nicht nothwendig eine Änderung der äusseren Umrisse. Doch ist solche Gestaltung im Hyaloplasma in der mannigfachsten Weise thätig, indem Pseudopodien entstehen und indem locomotorische Bewegungen sich abspielen. Hand in Hand damit vollzieht sich in bekannter Weise im Innenplasma die hin- und hergehende Strömung, welche durch die relativ ruhende peripherische Schicht eingedämmt ist (Fig. 7, *r* ruhende, *s* strömende Partie). Diese wird bei einiger Mächtigkeit wohl immer unter Mitbetheiligung von Körnerplasma gebildet, das, wie später gezeigt werden soll, verhältnissmässig ansehnlichere

1) Vgl. DE BARY, Pilze 1884, Mycetozoen 1864, II. Aufl., p. 41; CIENKOWSKI, Jahrb. f. wiss. Bot. 1863, Bd. III. p. 327, 405.

2) Vgl. vorige Abhandlung p. 157.

Digitized by Google

Cohäsion besitzt, jedoch sich nicht anderweitig vom strömenden zähflüssigen Plasma unterscheidet. Denn thatsächlich kann letzteres durch Zunahme der Cohäsion zu ruhendem Plasma werden, während dieses umgekehrt in den bewegten zähflüssigen Zustand zurückzukehren vermag. (Mehr hierüber Kap. V.)

Die Existenz einer schleimigen Hülle um das Plasmodium, die offenbar nicht mehr zur Leibessubstanz des Protoplasmas gehört, mag hier nur kurz mit dem Anfügen bemerkt werden, dass eine solche an den in sehr intensiver Ausgestaltung begriffenen Theilen der Plasmodien von Chondrioderma gewöhnlich nicht wahrzunehmen ist[1]).

In den Plasmodien sind bekanntlich stets grössere und kleinere Vacuolen in ziemlicher Zahl vorhanden, mit deren Existenz natürlich bei den auf Neubildung bezüglichen Untersuchungen gerechnet werden muss[2]). Die grösseren Vacuolen pflegen übrigens unter sonst normalen Verhältnissen bei Aufenthalt in Wasser zu schwinden, und speciell solche Plasmodien, in denen höchstens einzelne Vacuolen einen Durchmesser bis zu 0,01 mm erreichten, dienten zu den Versuchen über Vacuolenbildung.

Von den vorhandenen Vacuolen führt ein Theil der kleineren (bis etwa 0,006 mm Durchmesser erreichenden), wie seit Cienkowski[3]) bekannt ist, Pulsationen aus. In Bestätigung der Beobachtung dieses Forschers kann ich noch hinzufügen, dass solche pulsirende Vacuolen sich nicht nur im Hyaloplasma, sondern auch im Körnerplasma nachweisen lassen. Neben den in der Systole der Wahrnehmung entschwindenden Vacuolen fand ich aber auch solche (von 0,004—0,01 mm), die ihren Durchmesser in kürzeren sehr unregelmässigen und oft langen Intervallen nur wenig oder auch bis unter die Hälfte verkleinerten. Rechnet man dazu, dass gelegentlich in einer bisher pulsirenden Vacuole die totalen oder partiellen Contractionen ganz eingestellt werden, so sind die veränderlichen Vacuolen

1) de Bary, Pilze 1884, p. 459.

2) Vgl. de Bary, Pilze 1884, p. 457 und ausser Abbildungen bei Cienkowski und de Bary unsere Taf. II, auf welcher in Fig. 1 und 2 grosse künstlich erzeugte Vacuolen abgebildet sind, während in Fig. 6 kleinere nie fehlende Vacuolen zu bemerken sind.

3) Jahrb. f. wiss. Botanik 1863, Bd. 3, p. 329, 411.

Digitized by Google

vollständig mit denen verknüpft, welche in kürzeren Zeitintervallen keine merkliche Volumschwankung ausführen. Da aber solche stabile und auch schwächer pulsirende Vacuolen nachweislich als Neubildungen erzeugbar sind, so dürften wohl auch die in der Systole der Wahrnehmung entschwindenden Vacuolen wenigstens theilweise durch neugebildete ersetzt werden[1]). Übrigens können wir über diese Fragen und die Modalitäten der Pulsation an dieser Stelle hinweggehen und es sei nur noch bemerkt, dass offenbar auch sehr kleine, nicht mehr sicher erkennbare Vacuolen in dem Plasmodium vorkommen, da alle Grössenabstufungen bis zu solchen gefunden werden, die mit den besten optischen Hülfsmitteln nicht mehr sicher erkennbar sind.

Im übrigen haben wir hier nicht nöthig, auf den näheren Aufbau des Plasmakörpers einzugehen. Dass die geformten und bleibenden Körnchen, die vorläufig immerhin als Mikrosomen zusammengefasst werden mögen, theilweise mindestens Fremdkörper vorstellen, wurde schon erwähnt. Bekannt ist auch die Existenz zahlreicher kleiner Zellkerne, die aber gewöhnlich erst durch Fixiren und Färben sichtbar werden[2]).

B. Neubildung der Hautschicht.

Eine unzweifelhafte Neubildung von Hautschicht ist beim Durchschneiden von Plasmodiensträngen zu beobachten, indem das an der Schnittfläche zu ergänzende Hautschichtstück aus dem freigelegten Körnerplasma seinen Ursprung nimmt. Eine solche Neuproduction übersieht man in unzweideutigster Weise bei Verwendung von Plasmodiensträngen, deren Oberfläche durch adhärirende Fremdkörper markirt ist. Eine derartige Umhüllung durch irgend welchen Detritus kommt oft natürlich vor, oder ist durch zuvorigen Aufenthalt

---

1) Eine Neubildung einer pulsirenden Vacuole tritt nach Hofer (Untersuchungen über den Einfluss des Kerns auf das Protoplasma 1889, p. 67) bei Amoeba Proteus ein. Denn bei der künstlichen Zweitheilung dieses Organismus bildet diejenige Hälfte, welche die einzige vorhandene pulsirende Vacuole nicht mitbekommt, eine solche in sich aus.

2) Vgl. de Bary, Pilze 1884, p. 458; Lister, Annals of botany 1888 89, Bd. II, p. 21.

Digitized by Google

in fein suspendirtem Carmin u. s. w. leicht zu erreichen. In so vorbereiteten Strängen, deren Durchmesser zwischen 0,3 und 0,05 mm lag, wurde in vielfachen Versuchen beim Durchschneiden unter Wasser übereinstimmend beobachtet, dass sich das freigelegte, mehr oder weniger hervorquellende Körnerplasma schnell scharf abgrenzte und gewöhnlich war schon nach ½ bis 3 Minuten ein Hyaloplasmasaum merklicher Dicke vorhanden, der öfters bald begann sich auszugestalten und Pseudopodien zu bilden (Fig. 4). Die Schnittränder blieben dabei vollständig deutlich und wurden gewöhnlich nur ein wenig einwärts gebogen, wie das auch z. B. bei gleicher Operation an Strängen aus 3- bis 5-procentiger erstarrter Gelatine der Fall ist. Je nach der gestaltenden Thätigkeit in den bezüglichen Plasmodien wurde dann die Differenz in dem Aussehen der alten und neuen Hautschicht in kürzerer oder etwas längerer Zeit verwischt.

Diese Thatsachen sind an dickeren Strängen schon bei ganz schwacher Vergrösserung zu übersehen, doch ist die Beobachtung an dünneren Strängen geboten, da man an diesen auch eine nähere Einsicht in den Bildungsvorgang gewinnt. In den meisten Fällen wird etwas Plasma abgestossen, das sich mehr oder weniger vacuolisirt (vgl. Fig. 4). Das freigelegte Körnerplasma bildet dann an seiner Oberfläche unmittelbar die Hautschicht, oder ein Theil der äussersten Schicht geht unter dem Anprall des Wassers zunächst zu Grunde, worauf die nun an die Oberfläche gerückten Partien die Bildung der Hautschicht übernehmen. Bei stetiger Beobachtung kann man dabei in ganz zweifelloser Weise sehen, dass in dem alten Hyaloplasma durchaus keine Vorgänge sich abspielen, die etwa, unabhängig von dem Zusammenneigen der Schnittränder, zu einem Überziehen der Schnittfläche mit Hautschicht führen könnten. Vielmehr geht unzweideutig das oft schnell sichtbar werdende Hyaloplasma aus dem Körnerplasma hervor, indem in diesem die Körnchen in entsprechender Weise aus der Peripherie zurücktreten.

Es ist aber selbstverständlich, dass ausser durch partielle Neubildung, die Continuität der Hautschicht auch durch Zusammenschliessen dieser erhalten und hergestellt werden kann. In solcher Weise wird in der That immer die Continuität erreicht, wenn in einem Plasmodiumstrange, sei es durch normale Gestaltungsvorgänge oder durch mechanische Dehnung, nach zuvoriger Verdünnung eine

Digitized by Google

Trennung eintritt. Ebenso spielt sich bekanntlich das Zerreissen in den Zellen anderer Pflanzen ab und wenn in diesen, z. B. in Vaucheria, nach dem Zerschneiden ein continuirlicher Plasmaschlauch um den Zellsaft wieder hergestellt werden soll, wird im Allgemeinen zu dem Zwecke der Wandbelag sich zusammenneigen müssen. (Vgl. Kap. III.) Damit wird es thatsächlich aber schwer oder unmöglich direct zu entscheiden, ob nicht nebenbei auch eine Neubildung von Hautschicht aus dem übrigen Plasma bei der Verkittung eine Rolle mitspielt. Dieserhalb und der ansehnlichen Grösse halber, liegen die Verhältnisse in den Plasmodien, in denen der Zellsaft auf kleine Vacuolen reducirt ist, ungleich günstiger für directe Beobachtung der Neubildung an der Schnittfläche des Protoplasmakörpers.

Die beschriebenen Versuche gelingen ebenso mit Aethalium septicum. Auch wurden solche Zerschneidungen schon mit gleichem Erfolge von de Bary[1]) und Strasburger[2]) ausgeführt, doch in unseren Fragen noch nicht kritisch ausgenutzt. Die ungleiche Hervorwölbung des Körnerplasmas an der Schnittfläche hängt wenigstens theilweise davon ab, ob die Plasmaströmung zu- oder abgewandt ist[3]). Bei dicken Strängen kommt es wohl auch vor, dass etwas grössere Ballen von Körnerplasma sich ablösen oder sich zum Ablösen bringen lassen, die sich bald allseitig von Hyaloplasma umkleidet zeigen und amöboide Gestaltungen weiterhin beginnen. Da indess die Neubildung der Plasmahaut durch andere Versuche genügend sicher gestellt wird, hatte ich keine Veranlassung derartige Versuche so auszuführen, dass eine Mitnahme von Hautschicht beim Ablösen unbedingt ausgeschlossen war.

Zerschneidet man die auf feuchtem Papier, aber an der Luft befindlichen Plasmodien, so ist ebenfalls nach einiger Zeit Hyaloplasma an der Schnittfläche entstanden.

Übrigens wurde auch durch Vornahme obiger Operationen in tiefblauer Lösung von Indigcarmin constatirt, dass zu keiner Zeit dieser nicht diosmirende Farbstoff durch die Schnittfläche ins Innere des Plasmodiums dringt.

Bei den weichen, plastischen Eigenschaften des Protoplasmas kann es nicht zweifelhaft sein, dass umgekehrt Hautschicht und Hyaloplasma wieder in das Körnerplasma aufgenommen und vertheilt werden können. Derartiges spielt voraussichtlich auch bei

1) Mycetozoen 1864, II. Aufl., p. 45.

2) Strasburger, Studien über Protoplasma 1876, p. 27. — de Vries (Jahrb. f. wiss. Botanik 1885, Bd. XVI, p. 494) hat wohl die Versuche Strasburger's mit Vaucheria, aber nicht die mit Plasmodien berücksichtigt.

Digitized by Google

der Vereinigung von Plasmodiumsträngen mit. Doch lässt sich aus der directen Beobachtung kein sicheres Argument ableiten, da bei solcher Verschmelzung die Hautschicht beider Stränge naturgemäss zunächst in Berührung tritt und in Continuität erhalten bleibt, während durch ferneres Eindringen von Körnchen und Körnerplasma die Communication der Stränge erreicht wird[1]).

Direct beobachtet aber wurde, dass die Hautschicht mitsammt dem von ihr umwallten Körper ins Innere des Plasmodiums gelangte und so zur Vacuolenwand wurde. Ich verfolgte dieses einmal, als eine fast bewegungslose Pandorina, das anderemal als ein Aggregat von Vitellinkrystalloiden in den engen Maschenraum zwischen zwei mächtigen Strängen des Plasmodiums von Chondrioderma gerathen war. Indem das Protoplasma durch entsprechendes Umwallen den nach zwei Seiten offenen Raum abschloss, wurden die genannten Objecte mitsammt imbibirendem und adhärirendem Wasser in einen zunächst von der Hautschicht abgegrenzten Raum gebracht, der nun im Körnerplasma lag und mit diesem als Vacuole strömend fortgeführt wurde. Diese Vacuole unterschied sich in nichts von anderen mit gleichem Inhalte und, wie an diesen, bildete die Vacuolenhaut auch nur einen kaum wahrnehmbaren hyalinen Saum, indem die bisher ziemlich mächtige Hyaloplasmaschicht mit dem Übergang in das Innere entsprechend reducirt worden war.

Dieser Modus der Vacuolenentstehung kommt indess sehr selten vor, da fast immer die geformten Körper in früher beschriebener Weise durch die Hautschicht ins Körnerplasma gelangen. Wenn aber in den Maschenräumen nur Wasser sich befindet, weicht dieses aus, sobald die begrenzenden Plasmodiumstränge sich anzunähern streben und so endlich sich vereinigen, ohne dass ein Wassertropfen als Vacuole ins Innere gelangte.

---

1) Vgl. Cienkowski, Jahrb. f. wiss. Bot. 1863, Bd. 3, p. 327; de Bary, l. c., p. 40.

Digitized by Google

C. Künstliche Neubildung von Vacuolen.

a) Methodisches und Vacuolenbildung durch Asparagin.

Eine Neubildung von Vacuolen gelang, wie schon angedeutet wurde, indem lösliche Stoffe in fester Form in das Plasmodium gebracht und in diesem Auflösung eingeleitet wurde. In der so eingeleiteten localen Differenz liegt die Ursache für die Abgrenzung von Vacuolen, die sich in jeder Hinsicht ebenso wie die normal vorhandenen verhalten. Übrigens können auch letztere geformte Partikel aufnehmen und, sofern durch deren Lösung die Turgorkraft vermehrt wird, vergrössern sich die präformirten Vacuolen ebenso wie die durch die Lösungsvorgänge neuentstandenen Vacuolen. Eine solche Vergrösserung ergiebt sich in jedem Falle als eine Folge gesteigerter osmotischer Leistung der Vacuolenflüssigkeit, und ohne gewisse osmotische Wirkung in dieser können sich Vacuolen im Plasmodium überhaupt nicht erhalten. Ehe wir indess die Übereinstimmung zwischen künstlichen und normal vorhandenen Vacuolen darlegen, ist es zweckmässig, die experimentellen Erfolge im Allgemeinen zu besprechen. Dass es sich um wirkliche Neubildungen und nicht um Aufnahme der festen Theile in präexistirende Vacuolen handelt, wird ebenfalls weiterhin näher bewiesen werden.

Die Fähigkeit der Plasmodien, feste Partikel löslicher Stoffe aus gesättigten Lösungen aufnehmen zu können, wurde schon früher besprochen[1]). Von solchen Körpern verwandte ich zu den hier in Betracht kommenden Versuchen namentlich Asparagin, ausserdem noch Gyps und nur nebenbei einige andere Stoffe. Ferner operirte ich noch mit Krystalloiden aus Vitellin und vereinzelt mit Calciumphosphat, die beide zwar in reinem Wasser nur wenig, innerhalb des Plasmodiums aber etwas mehr gelöst werden. Dass auch noch andere Stoffe in gleicher Weise nutzbar gemacht werden könnten, ist ja selbstverständlich, auch ist wenigstens der Aufnahme einiger schwer löslicher Körper früher gedacht worden.

Um praktisch verwendbar zu sein, dürfen die Körper einmal keine giftigen Wirkungen ausüben und ausserdem nicht zu löslich

1) Vorige Abhandlung p. 159.

Digitized by Google

sein. Denn wenn auf der einen Seite hohe Löslichkeit nur vortheilhaft für die Vacuolenentstehung ist, werden doch die Plasmodien mit Steigerung der osmotischen Wirkung der gesättigten Lösung in der zur Aufnahme fester Partikel nothwendigen Bewegung benachtheiligt oder auch weitergehend geschädigt. Während z. B. die Zufuhr von gesättigter Lösung des schwer löslichen Gypses ohne merkliche Reaction ertragen wird, gilt dieses nicht mehr für Asparagin. Doch kann dieses immerhin reichlich in Plasmodien aufgenommen werden und da die Versuche mit Asparagin besonders entscheidend sind, sollen sie auch zunächst besprochen werden.

Ersetzt man das umgebende Wasser bei gewöhnlicher Temperatur durch gesättigte Asparaginlösung, so beginnt bald, ähnlich wie beim Einbringen in 1- bis 2procentige Lösung von Traubenzucker, mehr oder weniger weitgehende Zusammenziehung des Plasmodiums[1]. In sehr bewegungstüchtigen kleinen Plasmodien macht sich indess oft nach einiger Zeit eine Ausgestaltung und ein Zurückgehen in die alte Bewegungsthätigkeit bemerklich, doch bleiben wiederum andere Plasmodien dauernd contrahirt, bringen es also nicht zu einer Accommodation an die umgebende Asparaginlösung. Diese Beobachtungen beziehen sich auf eine Versuchstemperatur von 13 bis 18° C. und es empfiehlt sich bei nicht hoher, aber doch gute Bewegung gestattender Temperatur zu operiren, da die Löslichkeit des Asparagins mit der Wärme sehr erheblich steigt. (Bei 13° C. lösen sich in Wasser 1,61, bei 100° 18,38 Proc. Asparagin.)

Den so accommodirten Plasmodien kann man nun Asparaginstückchen mit Erfolg darbieten, doch habe ich die Aufnahme letzterer zumeist dadurch für meine Versuche erreicht, dass ich ohne zuvorige Angewöhnung Asparaginpartikel in gesättigter Lösung zuführte. In den günstigsten Fällen begann nach nur geringer Contraction, etwa nach 5 Minuten, wieder die Ausbreitung der Plasmodien und damit die Aufnahme der Asparaginstückchen, die bei tüchtiger Bewegungsthätigkeit in derselben Weise und anscheinend ebenso leicht aufgenommen werden, als andere indifferente Fremdkörper. So konnten schon nach einer Stunde zahlreiche Asparaginstückchen in dem Plasmodium vorhanden sein, das nach längerer Zeit, bei

1) Vgl. auch Stahl, Botan. Zeitung 1884, p. 166.

Digitized by Google

genügender dauernder Zufuhr des festen Körpers, sehr zahlreiche Asparaginkryställchen enthielt, deren grösste etwa einen Durchmesser von 0,07 mm erreichten.

Am besten kam ich zum Ziele, indem ich kleineren Plasmodien unter Deckglas (das aber immer auf Papierstreifen ruhen muss) oder auch auf offenem Objectträger fein vertheiltes Asparagin so zuführte, dass die festen Partikel nur von einer Seite an das Plasmodium gelangten. Wenn nöthig wurde dieser Zustand nach einiger Zeit von neuem hergestellt. In genügend feiner Zertheilung, so dass die grössten Stückchen etwa 0,08 mm Durchmesser besitzen, erhält man Asparagin leicht, indem man nach dem Zerreiben mit Wasser aufschwemmt und die grösseren Stückchen durch kurzes Absetzen entfernt. Aber selbst bei Verwendung der bewegungstüchtigsten und von adhärirenden Fremdkörpern freien Plasmodien von Chondrioderma pflegte die Mehrzahl bei 13—18° C. sich zu contrahiren. Da indess bei guter Umsicht das erwünschte Ziel immer bei einzelnen erreicht wurde, hatte ich keine Veranlassung, nach einer Verbesserung der Methode zu streben. Bemerkt mag noch werden, dass eine ansehnliche Entwickelung von Bacterien nachtheilig ist und eine solche also in diesen Versuchen thunlichst zu vermeiden ist.

Aethalium septicum scheint im Ganzen weniger geeignet, als Chondrioderma difforme, doch kam ich in einigen wenigen Versuchen mit jenem zu ganz gleichem Resultat bezüglich der Aufnahme von Asparagin und der Vacuolenbildung durch eingeleitete Auflösung dieses Stoffes.

Zu den weiteren Versuchen verwendete ich fast immer Plasmodien, welche während 6 bis 20 Stunden bei ziemlich constanter Temperatur Asparaginstückchen aufgenommen hatten. Ebenso wie Carmin oder Indigo finden sich dann die Asparaginkryställchen zum allerkleinsten Theil in Vacuolen, während die meisten direct dem Protoplasma eingebettet sind [1]). Sollte, wie es mir zuweilen schien, gleich nach Beginn der Aufnahme gegenüber unlöslichen Fremdkörpern eine verhältnismässig etwas grössere Zahl von Asparaginstückchen in Vacuolen vorhanden sein, so hat das für unsere Versuche keine Bedeutung. Übrigens lässt ein solches Verhalten auch eine ganz plausible Erklärung zu.

Während die Plasmodien in der gesättigten Asparaginlösung bei constanter Temperatur verweilen, verhalten sich die aufgenommenen Asparaginpartikel ganz ebenso, wie Baryumsulfat, Indigo oder andere

---

1) Vgl. vorige Abhandlung p. 156.

Digitized by Google

unlösliche Körper. Wie diese werden sie also mit dem strömenden Protoplasma herumgeführt und in der früher beschriebenen Weise findet auch Ausstossen und Aufnahme der Asparaginstückchen statt. Ferner kommt in derselben Weise wie bei anderen Fremdkörpern, also im Ganzen selten, Aufnahme in eine Vacuole oder Ausstossen aus einer solchen zu Wege.

Wird aber nun durch Auswaschen mit Wasser das umgebende Asparagin völlig entfernt, so ist sehr bald jedes Asparaginstückchen in je eine Vacuole eingebettet, während die Vertheilung unlöslicher Fremdkörper beim Durchwaschen vom Wasser keine Veränderung erfährt. Es ist dieses die Folge davon, dass durch die so eingeleitete Lösung auch um die dem Protoplasma eingebetteten Asparaginkrystalle Vacuolen entstehen, die mit präexistirenden Vacuolen übereinstimmen und ebenso wie diese, sofern sie Asparaginstückchen enthielten, durch die osmotische Wirkung des sich auflösenden Asparagins fernerhin eine entsprechende Vergrösserung erfahren. Die Vacuolen sieht man plötzlich um die zuvor im Protoplasma eingebetteten Asparaginstückchen auftauchen (Fig. 5 u. 6, *a* vor, *b* nach begonnener Vacuolenbildung) und dann ziemlich schnell bis zu endlicher Grösse heranwachsen. Diese ist übrigens gegenüber den gewöhnlich in Plasmodien vorhandenen Vacuolen sehr ansehnlich, da einige Vacuolen bei gewöhnlicher Temperatur einen Durchmesser bis 0,08 mm erreichten (vgl. Fig. 1).

So lange die Vacuolen vereinzelt sind, werden sie von dem strömenden Plasma mit herumgeführt und erfahren beim Durchpressen durch enge Stränge vorübergehend Deformationen, von denen weiterhin die Rede sein wird (vgl. Fig. 7 u. 8). Waren aber Asparaginstückchen sehr reichlich aufgenommen, so kann das Plasmodium in eine schaumige Masse verwandelt werden, wie eine solche auch im Protoplasma anderer Pflanzen in gewissen Stadien vorkommt. In Figur 1 ist ein solcher Fall abgebildet, in welchem 1 Stunde nach dem Auswaschen des umgebenden Asparagins in den meisten Vacuolen noch ungelöste Asparaginstückchen vorhanden waren. Auch in diesem Falle führt das Plasmodium noch locomotorische Bewegung aus und, wie in dünnen Strängen, findet in den trennenden dünneren Plasmalamellen die abwechselnd hin- und hergehende strömende Bewegung statt.

Digitized by Google

Da Wachsthum und endliche Grösse der Vacuolen von der osmotischen Leistung des Inhaltes abhängen, so muss dauerndes Durchwaschen von Wasser für beides begünstigend sein, da damit für fortwährende Entfernung des aus dem Plasmodium hervortretenden gelösten Asparagins gesorgt wird. Ebenso aber wird auch durch Erwärmung die Löslichkeit des Asparagins und damit, so lange ungelöstes Asparagin vorhanden ist, die osmotische Leistungsfähigkeit der Vacuolenflüssigkeit gesteigert. Dem entsprechend fand ich auch eine sehr merkliche Vergrösserung der Vacuolen, als ich nach deren Ausbildung bei 16° C. das Plasmodium auf einem heizbaren Objecttisch während 1/4 Stunde auf 29° C. erwärmte[1]), während mit dem Abkühlen auf 16° C. die Vacuolen wiederum sich allmählich verkleinerten. Übrigens habe ich mich auf diese allgemeinen und für das Wesen der Sache entscheidenden Beobachtungen beschränkt und nähre Messungen unterlassen. Bemerkt mag nur noch werden, dass mit dem Abkühlen kein Auskrystallisiren von Asparagin in den Vacuolen eintrat, wohl wesentlich weil Exosmose dauernd für eine langsame Entfernung des Asparagins aus den Vacuolen sorgt.

Aber auch die Neubildung der Vacuolen wird durch Einleitung thunlichst schneller Lösung begünstigt. Dieserhalb sorgte ich vielfach dafür, dass gleichzeitig mit dem beginnenden Auswaschen des Asparagins das Object eine Erwärmung erfuhr, indem ich den Objectträger auf einen etwa 30° C. warmen Tisch brachte und Wasser dieser Temperatur zum Auswachen anwandte. Schon eine halbe Minute später traten in günstigen Fällen Vacuolen um Asparaginkryställchen auf und die Mehrzahl dieser war schon nach 3 Minuten in eine Vacuole eingebettet. Doch wurde diese Bildung nur wenig verlangsamt, als ich bei constanter Temperatur (15—20° C.) für schnelles und dauerndes Durchwaschen von Wasser sorgte. Wird aber die das Plasmodium umgebende Asparaginlösung nur langsam verdünnt, etwa indem man mit nicht ganz gesättigter Lösung auswäscht, so bilden sich, dem Gesagten entsprechend, Vacuolen nur langsam und manche Asparaginstücke sind nach vielen Stunden und

1) Die Temperatur darf nicht wesentlich höher getrieben werden, da unsere Plasmodien über 30° C. geschädigt werden.

Digitized by Google

selbst nach einem Tage noch nicht in Vacuolen eingebettet, obgleich sie ganz allmählich eine weitgehende Lösung erfuhren.

Während solcher Entstehung und Vergrösserung der Vacuolen erhält sich, wie schon bemerkt, die Protoplasmaströmung dauernd und es scheint, dass durch das Auswaschen des umgebenden Asparagins die Plasmodien weniger in ihren Gestaltungen beeinflusst werden, als durch die plötzliche Zufuhr concentrirter Lösung dieses Stoffes[1]. Jedenfalls aber wird die Bildung der Vacuolen durch die eingeleitete Lösung der eingebetteten Asparaginstückchen bedingt. Denn nur um diese und nur insofern Lösung stattfindet, nehmen solche Vacuolen ihren Ursprung, nicht aber allgemein im Protoplasma, wie es ja der Fall sein müsste, wenn indirect durch die vom Asparagin ausgehenden Wirkungen eine Vacuolenbildung eingeleitet würde. Doch mag schon hier hinzugefügt werden, dass auch ohne solche Lösungsvorgänge Vacuolen in den Plasmodien neu entstehen und so begreiflicherweise auch mannigfache Einwirkungen, nöthigenfalls auch pathologische Zustände, eine Vermehrung der Vacuolen veranlassen können[2].

Anderseits ist aber auch zu beachten, dass es der vollen Thätigkeit des Protoplasmakörpers zum Entstehen der Vacuolen nicht bedarf. Denn ich erreichte die Bildung von Vacuolen um Asparaginkryställchen ebenfalls leicht, als ich nach Aufnahme dieser zunächst durch etwas Chloroform enthaltende gesättigte Asparaginlösung die Protoplasmaströmung sistirte und dann durch Auswaschen mit Wasser, das ebenfalls ein wenig Chloroform enthielt, die Bedingungen für die Vacuolenbildung in der oben beschriebenen Weise herstellte.

Die durch Asparagin neugebildeten und vergrösserten Vacuolen stimmen, abgesehen von den erheblichen Dimensionen, in ihrem Verhalten mit den normal im Plasmodium vorkommenden Vacuolen überein. Wie diese sind auch die Asparaginvacuolen befähigt, andere

1) Es mag dieses vielleicht theilweise damit zusammenhängen, dass das im Innern der Plasmodien sich allmählich lösende Asparagin einem zu unvermittelten Übergang zu einem asparaginfreien Zustand vorbeugt. Übrigens habe ich keine näheren Studien über die Accommodation der Plasmodien angestellt.

2) Solche als pathologisch gedeutete Ausbildung sehr ansehnlicher Vacuolen beschreibt Reinke für Aethalium in Unters. a. d. botan. Laborator. in Göttingen 1883, Heft 3, p. 55.

Digitized by Google

unlösliche Fremdkörper (z. B. Carmin) aufzunehmen und gelegentlich wieder in das Protoplasma zurückzugeben. Letzteres geschieht dann und wann auch mit den noch ungelösten Asparaginstückchen, um die sich dann eine neue Vacuole formirt. Auch können die Asparaginvacuolen sowohl unter sich, als mit normalen Vacuolen verschmelzen, doch ist eine Vereinigung von Vacuolen im Plasmodium überhaupt keine zu häufige Erscheinung. Dieses gilt ebenso für das Öffnen der Vacuolen nach aussen, das vereinzelt zu einer Entleerung des festen und flüssigen Inhalts der Asparaginvacuolen führt[1].

Schon durch das Ausstossen des Asparagins mittelst oder ohne Vacuole würde, bei mangelnder Neuzufuhr, eine allmähliche Entfernung des Asparagins aus dem Plasmodium erzielt werden. Dieses Ziel wird aber bei den in Wasser gehaltenen Plasmodien viel schneller durch Exosmose des Asparagins erreicht. Diese hat zur Folge, dass die Kryställchen dieses Stoffes mehr und mehr sich verkleinern und endlich schwinden, worauf dann die weitere osmotische Ausgabe des Asparagins die allmähliche Verkleinerung der Vacuolen herbeiführt. Diese waren in einigen Versuchen nach 5 bis 8 Stunden so ziemlich auf die geringe Grösse normaler Vacuolen reducirt, wenn die Plasmodien sich in ausreichender Menge von Wasser befanden und damit die günstigsten Bedingungen für exosmotische Bewegung geboten waren. Eine solche hört natürlich auf, sobald die Plasmodien in gesättigte Asparaginlösung gebracht werden, und da damit ebenfalls der Turgordruck in den Asparaginvacuolen aufgehoben ist, gehen diese bald auf entsprechend geringe Grösse zurück.

Das Asparagin vermag also verhältnissmässig leicht durch Hautschicht und Vacuolenwand der Plasmodien zu diosmiren, die auch Gypslösung, wie wir noch hören werden, leicht passiren lassen, während sie z. B. Anilinblau keinen Durchtritt gestatten. In diesen Eigenschaften aber stimmen präformirte und künstlich erzeugte Vacuolen überein und sie entsprechen also specifischen Befähigungen der Plasmodien, welche für die genannten Körper anscheinend viel leichter permeabel sind, als die Protoplasten höherer Pflanzen[2].

---

1) Vgl. vorige Abhandlung p. 159.

2) Über die Diosmose von Asparagin und Gyps durch die Zellen anderen Pflanzen ist nichts näheres bekannt. Die Erfahrungen über Asparagin als wandernden Körper geben in dieser Hinsicht keinen bestimmten Aufschluss.

Digitized by Google

Als Beispiel für die relativ schnelle diosmotische Ausgabe von Asparagin sei folgender Versuch mitgetheilt, in welchem das kleine Plasmodium unter Deckglas sich befand, das umgebende Wasser aber vermittelst capillarer Durchsaugung fortwährend langsam erwärmt wurde (Tpt. 16—19° C.). Eine Stunde nachdem zahlreiche Vacuolen durch Auswaschen erzeugt worden waren, konnte man an den eingeschlossenen Asparaginstückchen schon eine Verkleinerung erkennnen, die nach einer weiteren Stunde erheblich fortgeschritten war. Nach 3 Stunden, vom Beginn ab gerechnet, waren nur noch in einzelnen Vacuolen kleine Reste von Asparaginstückchen vorhanden. Auch diese waren nach 4 Stunden ganz verschwunden, und die Vacuolen hatten, theilweise schon sehr erheblich, an Grösse abgenommen. Nach 5 Stunden waren Vacuolen von auffälliger Grösse nicht mehr zugegen.

Zweifellos ist das Asparagin nicht nur in das Protoplasma, sondern auch durch die Hautschicht in das umgebnde Wasser gelangt. Denn an einen Consum der relativ grossen Menge Asparagin in so kurzer Zeit ist ebensowenig zu denken, wie an eine Aufstapelung dieser Menge als Lösung im Protoplasma. Auch wird die Exosmose des Asparagins aus dem Plasmodium direct damit erwiesen, dass die fernere Auflösung der in den Vacuolen eingeschlossenen Krystalle nach einiger Zeit kaum noch weiter fortschreitet, wenn ein mit vielen Asparaginstückchen versorgtes Plasmodium in thunlichst wenig Wasser gehalten wird, das allmählich mit Asparagin sich sättigt.

Das diosmotische Eindringen des Asparagins von aussen in das Plasmodium und dessen Vacuolen ist zwar zur Zeit nicht mit aller Sicherheit erwiesen, indess nicht zu bezweifeln. Vielleicht hängt übrigens zum Theil die Accommodation der Plasmodien an Asparaginlösung mit der entsprechenden diosmotischen Aufnahme dieses Körpers zusammen.

Dass präformirte und künstlich erzeugte Vacuolen sich hinsichtlich der Exosmose des Asparagins gleich verhalten, folgt schon daraus, dass letzteres gleicherweise aus allen grossen Vacuolen verschwand, wenn auch eine Anzahl dieser aus präformirten Vacuolen hervorgegangen war, die Asparaginkryställchen verschluckt hatten. Übrigens verfolgte ich auch eine derartig entstandene Vacuole, die durch ein ausserdem aufgenommenes Stückchen Indigo von bestimmter Gestalt sicher markirt war, und fand, dass die gänzliche Auflösung des nicht grossen Asparaginstückchens in etwas weniger als 3 Stunden erreicht war.

b) Vacuolenbildung durch Gyps.

Kryställchen von Gyps werden, in gesättigter Lösung dieses Körpers geboten, leicht und ohne merkliche Störungen in der Gestaltungsthätigkeit des Plasmodiums aufgenommen und verhalten sich im Innern dieses wie Asparagin in gesättigter Lösung und also auch wie unlösliche Fremdkörper. Nach Einbetten der Plasmodien in

Digitized by Google

reines Wasser entstehen Vacuolen in analoger Weise wie in derartigen Versuchen mit Asparagin, doch weit langsamer, und selbst bei dauernder Erneuerung des umgebenden Wassers trifft man noch nach 1 Stunde Gypsstückchen, welche keine Vacuole um sich bildeten. Es hängt dieses offenbar mit der verhältnissmässig geringeren Löslichkeit des Gypses zusammen, und dieserhalb erreichen auch die Vacuolen geringere Grösse, welche bei kugelförmiger Gestalt im Maximum bis etwa 0,04 mm stieg. Bei langgestreckter Gestalt der Krystalle waren die Vacuolen gewöhnlich entsprechend in die Länge gezerrt und anscheinend kommt bei solcher Anpressung zweier Enden an die Vacuolenwand häufiger ein Austritt der Krystalle aus den Vacuolen zu Wege[1].

Dieser Verhältnisse halber ist nun zwar Gyps weniger günstig als Asparagin, um direct die Neubildung von Vacuolen zu verfolgen. Doch gelingt solches immerhin bei einiger Geduld und die Beobachtungen liefern eine vollkommene Bestätigung der mit Asparagin erhaltenen Resultate.

Auch Gyps exosmirt aus den Vacuolen und auch aus dem Plasmodium, doch vergehen wohl 10 bis 20 Stunden ehe, selbst unter günstigen Bedingungen, die letzten Gypsstückchen gelöst sind und die Vacuolen sich wieder verkleinert haben. Da aber diese Verlangsamung schon durch die geringe Löslichkeit des Gypses bedingt sein könnte, lässt sich nicht bestimmt behaupten, dass die Plasmodien für Gyps schwieriger permeabel sind, als für Asparagin.

Die fernere empirische Erfahrung, dass die ungelösten Gyps enthaltenden Vacuolen beim Erwärmen von 16 auf 19° C. ihr Volumen nicht merklich ändern, steht in vollem Einklang mit der in diesen Temperaturgrenzen wenig veränderten Löslichkeit des Gypses. Zugleich aber wird durch diese Thatsache ein weiterer Beweis dafür geliefert, dass die Vergrösserung der Asparaginvacuolen mit dem Erwärmen nur eine Folge der mit der Löslichkeit gesteigerten osmotischen Wirkung des flüssigen Inhalts ist und also nicht irgend andere, mit der Wärme veränderliche Eigenschaften des Protoplasmakörpers eine wesentliche Rolle mitspielen.

---

1) Es wurden kleine durch Fällung erhaltene und noch weiter zerriebene Kryställchen verwendet.

Digitized by Google

Nach Goldammer[1]) enthält gesättigte Gypslösung bei 15° C. in 497, bei 30° C. in 475 Theilen 1 Theil wasserfreies Calciumsulfat. Übrigens wird die Löslichkeit durch Gegenwart anderer Stoffe zum Theil in etwas beeinflusst. Entsprechend der geringeren Löslichkeit ist aber auch die osmotische Leistung gesättigter Lösungen für Gyps viel geringer, als für Asparagin. Denn von letzterem lösen sich bei 13° C. 1,6 Proc., von wasserfreiem Calciumsulfat aber nur 0,2 Proc. Dabei ist die osmotische Leistung der Asparaginlösung bei gleicher gewichtsprocentiger Concentration der Calciumsulfatlösung ein wenig überlegen. Denn der isosmotische Coefficient ist wohl mit Gewissheit für beide 2,[2]) das Molekulargewicht, das also direct die Relation der osmotischen Leistung anzeigt, beträgt für Asparagin 131,6, für Calciumsulfat 135,6.

c) Vacuolenbildung durch Vitellin.

Neubildung und Vergrösserung präformirter Vacuolen wird auch durch Krystalloide von Vitellin erreicht, die leicht in das Plasmodium aufgenommen werden. Zwar sind diese Krystalloide in reinem Wasser fast unlöslich, im Protoplasma aber erfahren sie eine allmähliche Auflösung. Hierdurch wird also langsam osmotisch wirksame Substanz geschaffen, die in jedem Falle zur Vergrösserung und Erhaltung von Vacuolen nothwendig ist und ausserdem wird die Neubildung von Vacuolen, oder richtiger die der abgrenzenden Plasmahaut, wohl wesentlich dadurch unterstützt, dass die Krystalloide von Wasser durchtränkte Körper sind. Da aber die Existenz der Vacuolenhaut erst durch Ansammlung von Flüssigkeit in derselben bemerklich wird und die dazu nothwendige Lösung der Krystalloide langsam und an verschiedenen Krystalloiden in sehr ungleichem Grade von statten geht, so erscheinen die Vacuolen nur allmählich und es bedarf einiger Geduld und sorgfältiger Beobachtung, um einmal die Neubildung einer Vacuole unzweifelhaft zu constatiren. Diese Neubildung wird durch Wasserwechsel um das Plasmodium nicht, wie bei Gyps u. s. w., wesentlich befördert, da ja die ausserhalb des Organismus befindlichen Krystalloide fast ungelöst bleiben. Eine Entfernung dieser Krystalloide ist indess für Beobachungen zu empfehlen, um eine weitere Aufnahme in das Plasmodium zu verhindern.

1) Koller, Praktische Herstellung von Lösungen 1888, p. 105.

2) Wie für Magnesiasulfat, resp. Kohlehydrate; vgl. de Vries, Jahrb. f. wiss. Botanik 1884, Bd. XIV, p. 537 u. 615.

Digitized by Google

Vermittelst der Krystalloide lassen sich auch lösliche Körper, die in jene gespeichert werden, in das Plasmodium und in die Vacuolen einführen. Und da die so gefärbten Krystalloide sich in dem Plasmodium wesentlich wie die ungefärbten verhalten, sind die gefärbten um so mehr zu Studien vorzuziehen, als sie jederzeit leichter in dem Organismus zu verfolgen sind.

Ich operirte namentlich mit Krystalloiden, welche mit Anilinblau (in Wasser löslichem) tingirt waren und Fig. 2 (Taf. II) zeigt ein Plasmodium, dem seit 8 Stunden, durch Übertragen in reines Wasser, fernere Aufnahme von aussen abgeschnitten war. In diesem, wie in jedem anderen Falle, sind die blauen Vacuolen von sehr ungleicher Grösse, wurden übrigens bis zu einem Durchmesser von 0,05 mm beobachtet. Dabei ist die Färbung mehr oder weniger tief blau und im Innern erkennt man zunächst noch die ungelösten Reste des Vitellins.

Übrigens verhalten sich diese blauen Vacuolen analog wie andere Vacuolen, bieten aber durch ihre Färbung mancherlei Vortheile. So ist z. B. eine bestimmte Vacuole längere Zeit gut zu verfolgen, wenn man dafür sorgt, dass nur eine oder wenige blaue Vacuolen sich in in einem Plasmodium befinden. Ferner wurde die Vereinigung der blauen Vacuolen mit farblosen Vacuolen verschiedenen Ursprungs verfolgt. So konnte u. a. beobachtet werden, dass eine eben wieder entstandene pulsirende Vacuole mit einer blauen Anilinvacuole verschmolz und das so erzielte Product die Pulsationen einstellte. Ebenso vereinigten sich aber auch solche blaue Vacuolen mit Vacuolen, die durch Asparagin in der früher beschriebenen Weise neugebildet worden waren. In diesen Versuchen war Asparagin in Plasmodien eingeführt, welche zuvor blau gefärbtes Vitellin aufgenommen hatten.

Die Vitellinvacuolen verschwinden, ebenso wie andere, theilweise durch Ausstossen, theilweise durch Austritt des gelösten Inhalts. Da aber letzteres bei der langsamen Lösung des Vitellins nur sehr allmählich geschieht, so würden sich diese Vacuolen lange halten können, wenn nicht Ausstossen der Vacuolen und der eingeschlossenen ungelösten Masse zur Beseitigung wesentlich mithülfen. Immerhin habe ich zuweilen einzelne ungefärbte oder gefärbte Vitellinvacuolen bis zu 3 und 4 Tagen verfolgt, während in anderen Fällen schon nach 2 Tagen sämmtliche Vitellinvacuolen aus dem Plasmodium beseitigt waren.

Digitized by Google

Nach Lösung des Vitellins beginnt anscheinend allgemein eine Verkleinerung der bezüglichen Vacuole und darnach muss das gelöste Vitellin durch die Vacuolenhaut diosmiren, mag aber wohl ganz oder theilweise im Protoplasma zu Ernährungszwecken verwandt werden. Aus dieser Exosmose und der ungleich schnellen Auflösung der einzelnen Krystalloide wird die sehr verschiedene Grösse dieser Vacuolen verständlich. Zieht man dazu noch die relativ geringe osmotische Leistung gelöster Eiweissstoffe[1]) in Betracht, so ist auch begreiflich, dass die maximalen Grössen für die Asparaginvacuolen ansehnlicher ausfallen, als für die Vitellinvacuolen. Wie viel für die Vergrösserung letzterer die Miteinführung von Anilinblau beiträgt, habe ich nicht zu ermitteln gesucht. Übrigens kommt auch dem Anilinblau eine relativ nicht ansehnliche osmotische Leistung zu[2]).

So weit meine Beobachtungen ein Urtheil gestatten, vermag Anilinblau nicht oder jedenfalls nur in verschwindend geringem Grade aus den Vacuolen zu diosmiren. Denn nach der vollständigen Lösung des Krystalloides und des in diesem gespeicherten Farbstoffs bewahrten die Vacuolen, so lange sie beobachtet wurden (bis 24 Stunden), ihre blaue Färbung und wurden mit der Verkleinerung anscheinend tiefer gefärbt[3]). Es stimmt dieses auch mit der früher gewonnenen Erfahrung, nach der das von aussen gebotene Anilinblau nicht in andere Pflanzen und anscheinend auch nicht in das Plasmodium von Chondrioderma eindringt[4]) und ich kann noch hinzufügen, dass bei solcher Behandlung die in einem Plasmodium eingeschlossenen farblosen Vitellinvacuolen keine Färbung annehmen. Eine die Exosmose verhindernde Speicherung durch das in den Vacuolen gelöste Vitellin ist übrigens auch deshalb kaum anzunehmen, da wenigstens die Diosmose anderer Anilinfarben durch gelöstes Albumin nicht verhindert wird[5]).

Zu meinen Versuchen diente von Grübler bezogenes und vermuthlich aus Kürbissamen dargestelltes krystallisirtes Vitellin. Zur Imprägnirung mit

---

1) Pfeffer, Osmot. Untersuchungen 1877, p. 74, 175.

2) Pfeffer, Unters. a. d. bot. Institut zu Tübingen Bd. II, p. 302.

3) Man vergleiche dazu die schnelle Exosmose von Asparagin und Gyps, p. 204.

4) Unters. a. d. botan. Institut in Tübingen Bd. II, p. 269. Ein neuerer Versuch mit Chondrioderma liess keine Aufnahme von Anilinblau erkennen.

5) Pfeffer, l. c., p. 282.

Digitized by Google

Anilinfarben[1]) wurde eine kleine Menge der Krystalloide in einem Glasschälchen mit der Farbstofflösung (etwa 0,1 bis 0,01 Proc. enthaltend) übergossen, nach 24 Stunden die Lösung entfernt, mit etwas Wasser abgespült und zu fernerem Gebrauche in dem Glasschälchen dem Abtrocknen überlassen. Anilinblau und Congoroth wird in reichem Maasse, Methylenblau in etwas geringerer Menge in den Krystalloiden gespeichert. Das gefärbte oder ungefärbte Vitellin, welches aus einzelnen oder aggregirten Kryställchen besteht, wurde in üblicher Weise dem Plasmodium zur Aufnahme geboten.

In reinem Wasser ist zwar das Vitellin unlöslich, da aber verschiedene Stoffe mehr oder weniger lösend wirken[2]), ist nicht zu sagen, ob nur irgend welche Salze im Plasmodium und in der Vacuole Lösung erzielen, oder ob dabei auch ein Enzym mitspielt[3]). Übrigens geht Vitellin aus verschiedenen Ursachen in eine unlösliche Modification über[4]) und solche partielle Umwandlung pflegt auch in sehr verschiedenem Grade einen Theil der Krystalloide betroffen zu haben. Dieserhalb bleibt, wie ebenso beim Lösen in Dinatriumphosphat, vielfach ein gequollener, ungelöster Körper in den Vacuolen, welcher bei Gegenwart von Anilinblau tief tingirt ist und bei flüchtiger Betrachtung zuweilen den Eindruck erwecken kann, als ob in der Vacuole eine zweite kleinere eingeschachtelt wäre.

Schon dieser quantitativen Differenz halber werden offenbar die einzelnen Krystalloide nicht gleich schnell im Plasmodium gelöst. Ausserdem sind wohl nicht überall im Protoplasma und sicher nicht in den verschiedenen Vacuolen dieselben Bedingungen gegeben. Abgesehen von dem besonderen Inhalt künstlich erzeugter Vacuolen wird eine Differenz in den normal entstandenen Vacuolen z. B. damit angezeigt, dass die aufgenommenen Carminstückchen der Regel nach in Chondrioderma ungelöst bleiben, ausnahmsweise aber auch einmal eine durch Lösung roth gefärbte Vacuole gefunden wird[5]).

Erwärmung scheint auf die Lösung des Vitellins in dem Plasmodium keine auffällige Einwirkung zu haben, wenigstens vergrösserten sich die durch Anilinblau gefärbten Vacuolen nicht auffällig, als von 17° C. auf 29° C. erwärmt wurde.

---

1) Über Speicherung von Anilinfarben in Krystalloiden vgl. Schimper in Lehmann's Molekularphysik 1888, Bd. I, p. 572.

2) Vgl. Fr. Schwarz, Zusammensetzung d. Protoplasmas 1887, p. 203.

3) Über Verdauung durch Plasmodien vgl. Lister, Annals of Botany 1888/89, Bd. II, p. 7.

4) Vgl. Schwarz, l. c.

5) So ist auch vollständig erklärlich, warum, der Regel entsprechend, de Bary (Pilze 1884. p. 487) bei Carminaufnahme in das Plasmodium von Chondrioderma keine farbigen Vacuolen fand. Wenn solche dagegen de Bary bei Didymium serpula beobachtete, so muss andererseits fraglich bleiben, ob dieses jedesmal zutrifft.

Digitized by Google

d) Methylenblau in Vitellinvacuolen.

Die Vitellinkrystalloide werden zwar durch Methylenblau weniger intensiv gefärbt und bei längerem Stehen mit Wasser kann ihnen der Farbstoff mit der Zeit wieder ziemlich entzogen werden, immerhin aber gelingt es, bei schneller Aufnahme schön blaue Krystalloide in Vacuolen zu finden. Diese werden nie so tief blau wie mit Anilinblau und verlieren mit der Zeit den gelösten, wie den grösseren Theil des imbibirten Farbstoffs, da nach 10 bis 24 Stunden die ungelösten Theile des Krystalloids ziemlich ungefärbt sein können. Demgemäss exosmirt Methylenblau aus der Vacuole, wie umgekehrt auch dieser Farbstoff von aussen diosmotisch in das Plasmodium dringt[1]).

e) Einführung von Congoroth und Lacmus.

Reichlich wird in Vitellinkrystalloiden Congoroth gespeichert und der in beschriebener Weise in den Vacuolen eingeführte Farbstoff scheint, wie Anilinblau, aus den Vacuolen nicht zu exosmiren[2]). Dieser Farbstoff, der neutral und alkalisch roth[3]), in saurer Lösung aber blau ist, giebt so einen Indicator für die Reaction in der Vacuolenflüssigkeit ab, die nach ihrer rothen, höchstens ein wenig ins bläuliche spielenden Färbung neutral oder eine Spur sauer reagiren muss. Dem entsprechend wurde eine deutliche Bläuung der Vacuolen erzielt, als die Plasmodien in 0,02procentige Citronensäure kamen. Zugleich ist auch damit erwiesen, dass durch die Plasmodien, wie durch die lebenden Protoplasmakörper anderer Zellen, Citronensäure ohne Schädigung zu diosmiren vermag[4]).

1) Pfeffer, Unters. a. d. botan. Institut zu Tübingen Bd. II, p. 222. — Gerbsaures Methylenblau verhält sich gegenüber Plasmodien wie Carmin und andere in Wasser unlösliche Körper.

2) Ein entsprechendes Resultat erhielt ich mit anderen Pflanzen. Tübinger Unters., l. c., p. 268.

3) Als Indicator empfohlen von Julius, sowie von Hosslin (Chem. Centralblatt 1886, p. 435). In Lösungen ist Congoroth, auch bei Gegenwart von Eiweissstoffen sehr empfindlich, während in gespeichertem Zustande erst ein ziemlicher Überschuss von Säure Bläuung erzielt. Es verhält sich also darin ähnlich wie Cyanin. Vgl. Pfeffer, l. c., p. 260.

4) Pfeffer, l. c., p. 290. Nach Versuchen von de Vries (Jahrb. f. wiss. Botanik, Bd. XIV, p. 460) scheint Citronensäure relativ langsam in die Zellen von

Digitized by Google

Auch Versuche mit Lacmus führten zu gleichem Resultate, indem Stückchen des direct dargebotenen Farbstoffs, welche in Vacuolen geriethen, in diesen schwach saure oder neutrale Reaction anzeigten. Da aber, wie schon erwähnt wurde, in demselben Plasmodium der Vacuoleninhalt Differenzen bieten kann, so ist es um so mehr möglich, dass derselbe in anderen Fällen eine stärker saure Reaction besitzt, wie solches von Metschnikoff[1]) für Didymium farinaceum, Spumaria alba und andere Myxomyceten mitgetheilt wurde.

Auch die Bewahrung der rothen Farbe in den mit Alkanna gefärbten Öltröpfchen[2]) während ihres Aufenthaltes in Plasmodien beweist, dass sich in jenen die wahrscheinlich von Haus aus schwach saure Reaction nicht ändert.

f) Versuche mit anderen Körpern.

Auf mehr beiläufige Versuche mit einigen anderen Körpern mag nur kurz hingewiesen werden.

Das normale Calciumphosphat verhält sich insofern ähnlich wie Vitellin, als es in reinem Wasser unlöslich ist, jedoch im Plasmodium allmählich gelöst wird und ebenfalls aus dem Plasmodium exosmirt. Eine solche Lösung in dem Plasmodium ist übrigens leicht verständlich, da dieselbe schon durch Kohlensäure herbeigeführt werden kann.

In ähnlicher Weise, jedoch kaum so gut als durch Gyps, konnten auch durch die schwer löslichen Körper Phloridzin und Gentianablau Vacuolen erzeugt resp. vergrössert werden.

g) Methodische Hinweise.

Gegenüber denjenigen Zellen, die im Allgemeinen nur diosmirende Körper in sich aufnehmen, bieten die Plasmodien und sich ähnlich verhaltende Protoplasmakörper eine für die wissenschaftliche Untersuchungsmethode ungemein bedeutungsvolle Eigenschaft. Denn mit der Einführung der verschiedenartigsten Körper ist es möglich, auch Stoffe zu incorporiren, die geeignet sind für sich oder im Vereine mit anderen Reagentien Aufschluss

---

Begonia manicata zu diosmiren. — Über die gewöhnlich alkalische Reaction des Plasmas, die indess auch gelegentlich sauer werden kann, vgl. Pfeffer, l. c., p. 295. — Hinsichtlich der alkalischen Reaction der Plasmodien siehe auch Reinke, Unters. a. d. botan. Laboratorium in Göttingen 1881, Heft II, p. 9.

1) Centralblatt f. Bacteriologie 1889, Bd. 5, p. 513. — Über ähnliche Beobachtungen in Amöben und Infusorien vgl. Engelmann in Hermann's Handbuch der Physiologie 1879, p. 349.

2) Vgl. die vorige Abhandlung p. 152.

Digitized by Google

über die Zustände und Vorgänge im Protoplasma oder in den Vacuolen zu geben. Diese der grössten Mannigfaltigkeit fähige Methode wird unzweifelhaft dazu berufen sein, in der angedeuteten Richtung eine grosse und wichtige Rolle zu spielen. Die Gesammtheit der sich so eröffnenden Perspectiven lässt sich natürlich nicht sogleich überschauen und es wird auch kaum geboten sein, einige vorgezeichnete Bahnen näher zu discutiren. Einige allgemeine Hinweise glaube ich jedoch hier beifügen zu sollen, in der Hoffnung, dass vielleicht in weiteren Kreisen die Beachtung dieser Methodik angeregt wird.

In dem angedeuteten Sinne können natürlich auch lebendige Organismen[1]) verwendet werden, und das Verhalten dieser und ihrer Functionen unter normalen und künstlichen Bedingungen bietet in verschiedener Weise physiologische Reagentien, zu denen auch ein Erlöschen des Lebens in gegebenen Fällen zählt.

Todte Körper können ebensowohl in das Protoplasma, als in Vacuolen eingebettet werden und ersteres ist ebenfalls für lösliche Stoffe möglich, sofern diese in gesättigter Lösung geboten werden. Übrigens ist eine Lösungserscheinung an sich eine unter Umständen sehr werthvolle Reaction, die dann, wenn sie erst unter bestimmten Bedingungen und Combinationen eintritt, noch weitere Schlüsse gestatten kann. In dieser zuletzt angedeuteten Weise sind sicher solche Erfahrungen vielfach verschiedenen Zwecken dienstbar zu machen und ein eingeführter Körper kann wiederum als Reagens für einen anderen ausgenutzt werden. In einfachster Form geschah dieses in der Benutzung des Congoroths für den Nachweis, dass gelöste Citronensäure die Plasmodien durchwandert. Nahe liegt es ferner, Stoffe einzuführen, die, indem sie speichernd wirken, diosmotische Einwanderung anderer Körper erkennen lassen[2]). In anderer Weise bietet Methylenblau oder Indigcarmin mit etwas Eisenzusatz die Möglichkeit, das Eindringen des Wasserstoffsuperoxyds zu erkennen[3]).

Die Mittel aber, lösliche und nicht diosmirende Körper in das Plasmodium zu spediren, sind natürlich mit dem immer nur für bestimmte Fälle verwendbaren Vitellin (oder einem anderen Proteïnstoff) nicht erschöpft. Es gelingt z. B. auch, sehr kleine mit einer Niederschlagsmembran aus gerbsaurem Leim umhüllte Bläschen mit ihrem flüssigen Inhalt[4]) zur Aufnahme in Plasmodien

---

1) Vgl. vorige Abhandlung p. 153.

2) Vgl. Pfeffer, Unters. a. d. bot. Institut in Tübingen Bd. II, p. 182, 324.

3) Vgl. Pfeffer, Oxydationsvorgänge i. d. lebenden Zellen 1889, p. 99. — Beiläufig sei bemerkt, dass auch Platinmol reichlich und ohne Nachtheil in Plasmodien aufgenommen wird und so auch ein Mittel bildet, um gewisse Fragen in Angriff zu nehmen.

4) Auf solche Operation ist z. Th. auch die früher nur kurz (Tübinger Unters. Bd. II, p. 322 Anmerk. und Oxydationsvorgänge 1889, p. 565) ange-

Digitized by Google

zu bringen und anscheinend können sehr kleine Splitter engster Glascapillaren ebenfalls mitsammt dem capillar eingesogenen Inhalt zur Aufnahme gebracht werden.

Ausserdem hat man nicht nöthig, ausschliesslich chemische Reactionen an den eingeführten Stoffen auszunutzen und wir werden u. a. noch erfahren, wie auch mechanische Wirkungen auf eingenommene Körper für bestimmte Zwecke ausgebeutet werden können.

D. Näheres über die Bildung der Vacuolen und der Vacuolenhaut.

Nachdem die Entstehung von Vacuolen durch Lösung eingeführter Fremdkörper im Allgemeinen mitgetheilt ist, muss hier noch näher bewiesen werden, dass es sich hierbei um wirkliche Neubildungen, nicht etwa um Aufnahme in präformirte Vacuolen handelt. Weiterhin soll dann auch noch die Übereinstimmung zwischen normalen und künstlichen Vacuolen dargethan werden.

Asparaginkrystalle, die nicht in Vacuolen aufgenommen sind, sieht man in Vacuolen plötzlich mit der eingeleiteten Lösung erscheinen und darin liegt schon ein schwer wiegender Beweis dafür, dass es sich um Neubildungen handelt. Thatsächlich lehrt auch ein genauer Verfolg des Vorgangs, dass die Krystalle zuvor unmittelbar im Protoplasma eingebettet lagen, also nicht von einer Vacuole oder Vacuolenhaut umgeben waren, während bei der plötzlich eingeleiteten Bildung die benachbart liegenden präformirten Vacuolen nicht in Mitleidenschaft gezogen werden. Solche Beobachtungen wurden ebensowohl an kleinen als an grossen Asparaginstückchen angestellt (vgl. Fig. 5 u. 6). Der Vortheil der Grösse wird theilweise durch die körnige Trübung der dickeren Plasmodiumstränge aufgehoben und am besten, aber auch mit voller Sicherheit, übersieht man alle Einzelheiten, wenn die Beobachtungen in dünnen möglichst körnchenfreien Strängen angestellt werden, welche immerhin in günstigen Fällen Asparaginkrystalle bis zu 0,015 mm aufnehmen können. Dabei kann man immer Stränge wählen, in denen wenigstens für kurze Zeit die Bewegung stille steht und der Krystall sich also während der

---

deutete Einführung von Indigcarmin mittelst flüssigen Leims zurückzuführen. Von diesem waren nach dem Färben und Trocknen kleine Partikel zunächst mit etwas Gerbsäurelösung abgespült worden.

Digitized by Google

Vacuolenbildung nicht verschiebt. Theilweise wurde auch die Beobachtung angestellt, nachdem zuvor durch Chloroformwasser in der früher beschriebenen Weise die Plasmaströmung sistirt ward.

Die directe Erfahrung lehrt aber auch, dass, so lange Lösung vermieden ist, lösliche Stoffe in präformirte Vacuolen nicht reichlicher aufgenommen werden, als indifferente unlösliche Körper, von beiden also der Regel nach nur ein kleiner Bruchtheil in Vacuolen eingebettet erscheint. Für ansehnlichere Krystalle unterbleibt solche Aufnahme ganz, wenn sie die vorhandenen Vacuolen an Grösse überragen und man kann sich gut überzeugen, dass irgend ein Modus der Aufnahme, der ja immer eine entsprechende Vergrösserung und Formänderung einer Vacuole oder ein Zusammenwirken mehrerer Vacuolen voraussetzt, nicht stattfindet. Vielmehr bringen es von Anbeginn der Aufnahme ab sogar die gegen einen Asparaginkrystall gewaltsam durch die Plasmaströmung getriebenen Vacuolen nicht zu einer Adhäsion oder zu einer Ausbreitung und entfernen sich, von der Protoplasmabewegung getrieben, ebenso leicht wieder von dem Fremdkörper.

Diese gegenseitigen Verhältnisse bleiben aber dauernd dieselben, nachdem die Lösung des Krystalls eingeleitet ist. So lange keine Vacuole um den Asparaginkrystall enstand, verhalten sich auch die nächst herumliegenden oder angetriebenen Vacuolen in besagter Weise indifferent, obgleich doch jetzt die zur Vacuolenbildung führende Lösung eintrat, und demgemäss von den Asparaginstückchen aus gelöste Molekeln sich verbreiten. Wenn dann aber plötzlich die Vacuolenabgrenzung um den Fremdkörper realisirt ist, kann auch irgend eine andere Vacuole mit dieser neugebildeten verschmelzen, doch tritt, wie wir noch hören werden, Verschmelzung der Vacuolen überhaupt nicht allzureichlich ein. Ganz ebenso verhält es sich auch mit den pulsirenden Vacuolen, welche gleichfalls nach begonnener Lösung neben dem Asparaginstückchen, wie zuvor, verschwinden und wieder erscheinen. Uebrigens geht die Neubildung unserer Vacuolen auch vor sich, wenn die Thätigkeit der pulsirenden Vacuolen durch Chloroform sistirt wurde.

Mit diesen Erfahrungen sind aber auch die hypothetischen Tonoplasten von de Vries ausgeschlossen, denn diese Vacuolenbildner sollen ja nur Vacuolenanfänge sein und müssten zunächst zu sichtbaren Vacuolen werden, um eine Aufnahme der festen Körper zu Wege zu bringen.

Digitized by Google

Eine Gruppirung und ein Zusammenschliessen dieser supponirten Vacuolenbildner um das Asparaginstückchen und eine Entstehung der Vacuolenwand auf diese Weise ist von de Vries und den seiner Ansicht Folgenden bisher nicht gerade postulirt worden. Jedenfalls vermag man bei künstlicher Neubildung von Vacuolen im Hyaloplasma oder Körnerplasma mit den besten optischen Mitteln kein Zusammenwirken sichtbarer Theilchen wahrzunehmen und eine derartige Hypothese müsste schon den misslichen Sprung ins Unsichtbare machen[1]). Es liessen sich aber auch ausserdem verschiedene schwerwiegende Einwände erheben, von denen hier nur ein sehr gewichtiger herbeigezogen werden soll. Dieser ist damit gegeben, dass überhaupt die Vacuolenhaut erst durch die Lösungsvorgänge entsteht und nicht schon zuvor um das Asparaginstückchen vorhanden war. Denn häufig bei langsamer, seltener, aber doch zuweilen, bei schnellerer Lösung des Asparagins kommt es vor, dass trotz allmählich weitgehender Lösung des Krystalls keine Vacuole um ihn erscheint (vgl. p. 201). Eine Vacuolenhaut kann dann nicht vorhanden sein, da mit deren Existenz, so gut wie in benachbarten Vacuolen, das gelöste Asparagin durch osmotische Leistung auch eine sichtbare Vacuole erzielt haben müsste.

Mit diesem Nachweis ist zugleich gezeigt, dass nicht etwa die Fremdkörper beim Passiren der Hautschicht, also während der Aufnahme, mit Plasmahaut umkleidet werden. Gegen solche Abstammung der Vacuolenhaut spricht ferner auch die Erfahrung, dass ein Asparaginkrystall, nachdem er aus einer Vacuole ausgestossen ist, sogleich wieder um sich eine Vacuole bilden kann.

In den hier zu discutirenden Fragen ist es entscheidend, wenn nur für einen Fall eine Neubildung von Vacuolen festgestellt werden kann. Es kommt also auch zunächst nicht darauf an, ob alle im Protoplasma zur Lösung kommenden Stoffe ein gleiches Verhalten zeigen. Jedenfalls trifft dieses dem Wesen der Sache nach bei Gyps und mit Anilinblau gefärbtem Vitellin zu. Doch ist mit diesen sich langsam

---

1) Ebenso ist auch beim Durchschneiden der Plasmodien (vgl. p. 193) kein Zusammenschliessen von differenzirten Organen zu bemerken. Sollte aber irgendwo eine Aggregirung von Vacuolen zur Hautschichtbildung führen, so hätte das bei dem genetischen Verhältniss beider nichts Auffallendes. Übrigens dürfte auch dann, wenn Vacuolen ihren Inhalt nach aussen durch einseitiges Aufreissen entleeren, die Vacuolenhaut im Allgemeinen direct an dieser Stelle zur Plasmahaut werden können.

Digitized by Google

lösenden Körpern die Vacuolenentstehung nicht so schnell und sicher zu erzielen und so habe ich aus guten Gründen die eingehendsten Untersuchungen mit Asparagin angestellt.

Die Vacuolen können also, wie streng nachgewiesen wurde, als Neubildungen entstehen und damit ist ebenfalls sicher gestellt, dass die sie abgrenzende Plasmaschicht, die Vacuolenhaut, ein Differenzirungsproduct aus dem Cytoplasma ist. Natürlich muss das Protoplasma nicht seiner ganzen Masse nach zur Bildung von Plasmahaut geeignet sein und wie Zellkern und Chromatophoren scheinen auch die verschiedenen Differenzirungsproducte, die wir als Mikrosomen zusammenfassen, allgemein an dem Aufbau der Plasmahaut keinen Antheil zu haben. Denn die Vacuolen entstehen ebenso in körnchenfreien Plasmodiensträngen, und in der Vacuolenhaut scheinen, so weit die meist sehr geringe Mächtigkeit dieser ein Urtheil gestattet, bei Entstehung im Körnerplasma mikrosomatische Körper zu fehlen. Dieses ist ja evident in der Hautschicht, die bekanntlich im Plasmodium zu mehr oder weniger mächtigem Hyaloplasmasaum erweitert ist, dessen Entstehung durch Auswandern der Körnchen direct verfolgt werden kann. Auch für die Hautschicht wurde direct (p. 193) Neubildung aus dem Cytoplasma und zwar ohne Betheiligung der Mikrosomen erwiesen.

Hautschicht und Vacuolenhaut, die wir als Plasmahaut zusammenfassen, sind also genetisch gleichwerthig und die Entstehung von Plasmahaut ist immer gesichert, da mit der freien Oberfläche resp. in dem Contact mit dem fremden Medium die Bedingungen für Bildung der Plasmahaut aus Theilen des Cytoplasmas gegeben sind. In diesen Bedingungen ist aber auch in allem Wechsel der Form und Grösse der Oberfläche die continuirliche Erhaltung der Plasmahaut sicher gestellt, deren Bausteine mit der Entfernung von der Grenze von neuem sich im Cytoplasma vertheilen; jederzeit aber wieder befähigt sind, zum Aufbau von Hautschicht oder Vacuolenwand beizutragen. Diese beiden sind demgemäss ihrem Ursprung nach gleichwerthig und zunächst nur durch ihre räumliche Lage unterschieden. Es ist aber damit natürlich nicht ausgeschlossen, dass sie im Dienste des Organismus verschiedene Eigenschaften und Functionen erreichen. Durch das Bindeglied Cytoplasma können aber die Bausteine von Vacuolenhaut und Hautschicht wechselseitig ineinander übergeführt werden und wie auch direct die Hautschicht mit dem Einführen ins

Digitized by Google

Innere des Plasmodiums zu Vacuolenhaut werden kann, wurde früher erwiesen (vgl. p. 105). Ebenso kann mit dem Verschwinden von Vacuolen die Vacuolenhaut ihre Existenz einbüssen und dass Wiederaufnahme in das Cytoplasma für die Hautschicht unzweifelhaft möglich ist, folgt aus der Gesammtheit aller Thatsachen.

So wie die Bürger eines Staates mit der Beorderung an die Grenze in besonderen Dienst des Ganzen gestellt werden, der aber mit der Rückkehr ins Innere und mit der Aufnahme anderer Beschäftigungen erlischt, so sind auch Bausteine des Cytoplasmas befähigt, je nach ihrer Lage in der Grenzfläche oder im Innern im Dienste des Protoplasten zweckentsprechend zu functioniren. So wie aber nicht ein jeder Bürger zur Grenzwache herbeigezogen werden kann oder muss, so muss auch nicht jeder beliebige Theil des Protoplasmas zu solchem Dienste befähigt sein oder herangezogen werden und die einmal in die Plasmahaut gelangten Theile müssen nicht nothwendig dauernd oder lange Zeit in dieser verharren. Thatsächlich bleiben ja Zellkern und Chromatophoren der Plasmahaut des Cytoplasmas fern, dasselbe scheint für die verschiedenartigen Mikrosomen zu gelten und wir können durchaus nicht behaupten, dass jedes beliebige Micell des hyalinen Cytoplasmas zum Aufbau von Plasmahaut geeignet ist.

Aber wie dem im Näheren auch sein mag, jedenfalls verliert mit der nachgewiesenen Beziehung zwischen Plasmahaut und Cytoplasma, zunächst mit Rücksicht auf die Myxomyceten, jede Ansicht ihre Berechtigung, welche in irgend einer Form Hautschicht und Vacuolenhaut zu selbständigen und sich autonom erhaltenden Organen stempelt, wie es Zellkern und Chromatophoren sind. Eine solche Hypothese, wie sie bekanntlich von de Vries aufgestellt wurde, hat überhaupt nur einen Sinn, wenn strenge Autonomie für Hautschicht und Vacuolenhaut gefordert wird, denn Erhaltung durch Descendenz kommt natürlich, wie jedem Organismus, auch dem Cytoplasma zu [1]). Nach Widerlegung dieser supponirten Autonomie kann natürlich nicht mehr von Tonoplasten als besonderen Organen für die Vacuolenbildung die Rede sein, und eine Aufrechterhaltung dieser Bezeichnung für die aus Cytoplasma entstehende Vacuolenhaut scheint mir praktisch nicht geboten.

1) Vgl. auch Pfeffer, Unters. a. d. botan. Institut zu Tübingen 1886, Bd. 2, p. 322.

Digitized by Google

Mit dem Hervorgehen aus Cytoplasma verlieren natürlich Hautschicht und Vacuolenhaut nicht an Bedeutung. Um aber in allem Wechsel und trotz der unter Umständen in kurzer Zeit sehr ansehnlichen Vergrösserung oder Verkleinerung der Oberfläche stets die Continuität der Plasmahaut herzustellen und dauernd zu erhalten, muss es nur vortheilhaft erscheinen, dass, mit den gegebenen Bedingungen, das Cytoplasma selbst zur Plasmahaut wird.

E. Übereinstimmung normaler und künstlicher Vacuolen.

In den vorgeführten Untersuchungen ist auch erwiesen, dass die künstlich neugebildete Plasmahaut mit der normal vorhandenen identisch ist. Diese Übereinstimmung folgt für die Hautschicht aus den Versuchen, in welchen das Plasmodium an der Schnittfläche neue äussere Plasmahaut zu bilden hatte (p. 193).

Für die Identität künstlich erzeugter und normal vorkommender Vacuolen und damit der Vacuolenhaut sind bereits ausreichende Argumente an verschiedenen Stellen angeführt (vgl. z. B. p. 202, 207), doch dürfte eine gedrängte Zusammenfassung mit Inbezug noch weiterer Belege geboten sein.

Es ist schlechterdings unmöglich, künstliche Vacuolen nach ihrer Entstehung von präformirten irgendwie zu unterscheiden, und da letztere zur Aufnahme aller, auch löslicher Fremdkörper befähigt sind, so giebt der Inhalt ebenfalls kein Merkmal ab.

Beiderlei Vacuolen werden mit den Protoplasmaströmungen in gleicher Weise mit herumgeführt und erfahren bei Druck, z. B. in engeren Strängen, vermöge der Plasticität der Vacuolenwand, die schon erwähnten mechanischen Deformationen (Fig. 7, 8). Dabei kann es bei entsprechendem Zuge nach zwei Richtungen, wie ein solcher in Fig. 8 im Gange ist, dazu kommen, dass durch Einschnürung und darauf folgende Trennung der beiden Hälften eine Theilung der Vacuole erzielt wird. Eine solche Theilung habe ich auch an Vacuolen verfolgt, deren Neubildung durch Auflösung von Asparagin direct controlirt war. Ausserdem kommen auch Theilungen von Vacuolen im Plasmodium vor, in denen solche mechanische Ursachen wenigstens nicht direct in die Augen springen. Wenn übrigens meine in dieser Richtung ganz unzureichenden Beobachtungen ein Urtheil gestatten, dürfte in den Plasmodien die Vermehrung der Vacuolen

Digitized by Google

durch Theilung nicht allzu ausgiebig sein und also Neubildung stets eine ausgedehnte Rolle spielen, gleichviel ob innere oder von aussen kommende Ursachen dabei im Spiele sind.

Eine Verschmelzung der Vacuolen unter einander ist zwar kein allzu häufiger Vorgang, kann indess bei einiger Geduld immer beobachtet werden (p. 203). Indess kommt es selbst dann häufig zu keiner Vereinigung, wenn zwei Vacuolen durch die Bewegungsvorgänge in dem Plasmodium gegeneinander getrieben werden. Denn selbst wenn dabei die Annäherung bis auf eine sehr dünne Trennungsschicht geht, werden doch häufig von neuem die Vacuolen von einander entfernt. Um Übrigen vollzieht sich die Verschmelzung ebenso wie in den Zellen anderer Pflanzen und in gleicher Weise bei künstlichen und normalen Vacuolen, die beide auch untereinander sich vereinigen können. Letzteres habe ich u. a. an neu entstandenen Asparaginvacuolen verfolgt (p. 214) und zweimal sah ich eine solche Asparaginvacuole mit einer eben wieder aufgetauchten pulsirenden Vacuole sich vereinen. Dabei hörte eine auffällige Pulsation ebenso auf, wie bei dem Verschmelzen einer pulsirenden, mit einer durch Anilinblau gefärbten Vitellinvacuole, deren Entstehung nicht näher constatirt war (p. 207).

Übrigens sind pulsirende und nichtpulsirende Vacuolen überhaupt durch alle Übergänge verkettet. Dem entsprechend konnte ich gelegentlich kleine blaue Vitellinvacuolen verfolgen, die in grossen und sehr unregelmässigen Intervallen ihren Durchmesser mit mässiger Schnelligkeit verkleinerten und sehr allmählich wieder vergrösserten. In einem concreten Fall fand ich Schwankungen zwischen 0,014 und 0,08 mm. Fast ebenso ansehnlich waren die Dimensionsänderungen, welche ich an einer neuentstandenen kleinen Asparaginvacuole beobachtete. Es ist auch schon darauf hingewiesen, dass die vollständig pulsirenden Vacuolen theilweise durch Neubildung entstehen dürften (p. 192).

In allen Vacuolen ist zur Existenz eine gewisse osmotische Leistung des Inhalts nothwendig, denn ohne eine solche findet unter dem von der Umhüllung ausgehenden Centraldruck Verkleinerung bis zum gänzlichen Schwinden statt. Dem entsprechend verhalten sich auch die durch Asparagin oder Gyps erzeugten Vacuolen mit der exosmotischen Entfernung des gelösten Inhalts. Und wenn bei Ausschluss der Aufnahme von Fremdkörpern die Plasmodien im Allgemeinen nur kleinere Vacuolen zu führen pflegen, so wird damit

Digitized by Google

geringere osmotische Wirksamkeit der vorhandenen Inhaltsstoffe angezeigt. Thatsächlich erreichen die präformirten Vacuolen durch Einführung von Asparagin gleiche Grösse, wie neuentstandene Vacuolen. Für beide ist somit auch die übliche plastische Dehnbarkeit und Wachsthumsfähigkeit der lebendigen Vacuolenhaut erwiesen.

Ferner stimmt das bis dahin bekannte diosmotische Verhalten überein. Aus künstlichen und präformirten Vacuolen exosmiren also nachweislich Asparagin, Gyps und Methylenblau, während beide Anilinblau nicht diosmotisch verlieren. Ferner nehmen beiderlei Vacuolen feste indifferente Partikel auf und stossen sie auch gelegentlich wieder aus. Ebenso können künstliche wie präformirte Vacuolen ihren gelösten und eventuell auch festen Inhalt in das umgebende Wasser entleeren, indem sie sich nach aussen öffnen.

Für Versuche mit stärkeren plasmolytischen Wirkungen sind die Plasmodien keine günstigen Objecte, da sie gar leicht sich zusammenziehen und mit der Gestaltänderung die Vacuolen durch Ausstossen u. s. w. mehr oder weniger verloren gehen. Immerhin habe ich mich überzeugt, dass durch Einwirkung 5procentiger Lösung von Traubenzucker in dem lebendigen Plasmodium auch die durch Asparagin entstandenen Vacuolen an Volumen abnehmen. Eine Isolirung der Vacuolen unter Tödtung des Organismus gelang in den wenigen derartigen Versuchen überhaupt nur sehr schlecht. Doch sah ich bei plötzlicher Einwirkung von 5procentiger, mit Eosin gefärbter Salpeterlösung zweimal einige Zeit die Vacuolenhaut um Vacuolen erhalten, die noch ein ungelöstes Asparaginstückchen enthielten, für die es aber nicht festgestellt war, ob sie durch Neubildung oder aus präformirten Vacuolen hervorgegangen waren.

F. Allgemeine Bildungsursachen der Vacuolen.

Mit der Neubildung der Vacuolen ist auch eine Entstehung der Vacuolenhaut aus dem Cytoplasma erwiesen und nach den Erfahrungen über Hautschicht und Vacuolenhaut müsste eine solche Bildung unzweifelhaft realisirt werden, wenn ein Tropfen einer wässerigen Lösung ins Innere des Protoplasmas geführt würde. Ein solcher directer Versuch ist zwar noch nicht durchgeführt, doch dürfte, wie schon erwähnt wurde, die anscheinende Begünstigung der Vacuolenbildung um die sich nur langsam lösenden Vitellinkrystalloide wohl auf die Durchtränkung dieser mit Wasser zurückzuführen sein (p. 206). Die gleiche Ursache mag wohl auch wesentlich dazu beitragen, dass die in ein Plasmodium aufgenommenen lebenden Organismen, wie

Pandorina, Chlamidomonas[1]) u. a., gewöhnlich ziemlich bald in eine Vacuole eingebettet erscheinen.

Nachweislich wird aber durch nicht imbibitionsfähige Körper, wie Asparagin und Gyps, in Folge der eingeleiteten Lösung und in Abhängigkeit von dieser die Neubildung von Vacuolen veranlasst. Mit solcher Lösung und der sich daran knüpfenden Diffusion des gelösten Stoffs in das Protoplasma wird in letzterem in der Umgebung des Fremdkörpers in jedem Falle eine gewisse Imbibitionsdifferenz erzielt. Ob nun schon diese Imbibitionsdifferenz die Abgrenzung einer Vacuole veranlasst, oder ob diese Abgrenzung erzielt wird, indem sich an der Oberfläche des sich lösenden Fremdkörpers eine, wenn auch noch so dünne wässerige Flüssigkeit sammelt, die nun wie ein Wassertropfen wirkt, muss ich dahin gestellt lassen. Letzteres kann immerhin entscheidend mit eingreifen, wenn auch nach der Bildung von Vacuolen ohne Gegenwart von ungelösten Fremdkörpern eine genügende Imbibitionsdifferenz als Ursache der Abgrenzung ausreichend erscheint.

Selbstverständlich ruft nicht jede Imbibitionsdifferenz im Protoplasma die Bildung einer Vacuole hervor. Denn in dem begrenzt quellungsfähigen Protoplasma kann der Wassergehalt, wie bei partiellem Austrocknen oder bei Plasmolyse, in gewissen Grenzen schwanken und bei localisirten Stoffwechselprocessen, wie bei Aufnahme oder Ausgabe von Stoffen, sind kleine Abweichungen von homogener Vertheilung gelöster Stoffe unvermeidlich. Dieses trifft ebenso bei jeder Lösung eines eingeführten Fremdkörpers zu und dennoch kann sowohl um Asparagin, wie noch häufiger um Vitellin oder Gyps, die Bildung von Vacuolen unterbleiben, obgleich nachweislich diese Körper sich allmählich lösen (p. 201, 205, 215). Beschleunigte Lösung aber ist der Vacuolenbildung günstig. Wenn diese wirklich, wie es mir schien, im ruhenden Plasma etwas gefördert ist, so würde dieses damit zu erklären sein, dass mit der Bewegung eine beschleunigte Ausgleichung der Imbibitionsdifferenzen herbeigeführt wird.

Da aber auch ohne Entstehung einer Vacuole Stückchen von Asparagin oder Gyps sich allmählich ganz lösen können, so fehlt in solchem Falle, wie schon früher (p. 215) gefolgert wurde, thatsächlich die eigentliche Vacuolenhaut, denn mit der Anhäufung osmotisch

---

1) Vgl. vorige Abhandlung p. 153.

Digitized by Google

wirkender Substanz müsste diese von dem Fremdkörper abgehoben werden und die Entstehung einer sichtbaren Vacuole veranlassen. Also entsteht in Contact mit jenen Körpern an der Grenzfläche des Protoplasmas keine Plasmahaut von den gekennzeichneten diosmotischen Eigenschaften, während eine solche in Berührung mit wässeriger Flüssigkeit gebildet und erhalten wird. Damit ist nicht ausgeschlossen, dass die Oberfläche des Protoplasmas in Berührung mit Asparagin oder Gyps gewisse Verschiedenheiten annimmt, welche vielleicht auch der definitiven Abgrenzung der Vacuolenhaut günstig sind. Ebenso ist vollständig unbekannt, ob nicht, abgesehen vom Wasser, die Qualität der Körper eine Rolle spielt, und ob etwa um Öltropfen im Plasmodium eine Plasmahaut von ähnlicher Beschaffenheit wie um Wassertropfen gebildet wird.

Nachdem die Neubildung ächter Vacuolen vermittelst Einführung von Fremdkörpern durchaus sicher gestellt ist, wird man wohl nicht daran zweifeln, dass auch unter gewöhnlichen Lebensverhältnissen in dem Plasmodium neue Vacuolen entstehen können und entstehen. Schon die normale Aufnahme verschiedener Fremdkörper, die ja zum Theil imbibirt sind und auch wohl gewisse Lösung im Plasmodium erfahren, muss zu gelegentlicher Entstehung von Vacuolen führen. Eine Bildung solcher wird aber, entsprechend der bisherigen Auffassung, dadurch möglich sein, dass irgendwo und irgendwie im Protoplasma sich Bedingungen für die Abgrenzung eines, wenn auch zunächst noch so minimalen Flüssigkeitströpfchens herstellen, das dann in dem Maasse sich vergrössert, wie es der osmotisch wirksame Inhalt fordert, welcher weiterhin auch durch geeignete Speicherung von Stoffen einen Zuwachs erfahren kann. Jedenfalls ist eine Entstehung auf solche Weise aus verschiedenen näheren Ursachen denkbar, die z. B. in localisirten Stoffwechselprocessen oder in entsprechenden Schwankungen des Imbibitionsvermögens im Protoplasma wurzeln können. Auch kann man sich wohl vorstellen, dass z. B. mit der Volumzunahme durch Quellung aus der Vergrösserung der peripherischen Schichten eine negative Spannung im Innern entspringt, welche in dem immer nur begrenzt quellungsfähigen lebendigen Protoplasma die Ausscheidung von wässeriger Lösung einleitet oder unterstützt. Es ist wohl möglich, dass bei der Vacuolisirung isolirter Protoplasmamassen dieses Moment eine Rolle spielt.

Digitized by Google

Es kann sich also nur darum handeln, zu entscheiden, in wie weit in einem gegebenen Falle eine Vacuole durch Neubildung oder durch Theilung ihren Ursprung nimmt. Speciell auf diese Frage gerichtete Untersuchungen stellte ich nicht an, doch gewinnt man den Eindruck, dass in den Plasmodien Neubildung, und somit auch Verschwinden von Vacuolen, neben Theilung hervorragend im Spiele ist (vgl. p. 218). Eine sichere Entscheidung ist in der That auch nicht so leicht, da man beim Auftauchen einer Vacuole nicht wissen kann, ob diese durch Vergrösserung einer kleinen, vielleicht bis an die Grenze der Wahrnehmung reducirten Vacuole oder durch Neubildung entstand.

Beachtet man aber, dass eine bestimmte Grenze zwischen relativ stationären und pulsirenden Vacuolen nicht besteht, dass ferner nachweislich neugebildete Vacuolen eine gewisse Volumschwankung bieten können (p. 219), so muss es als sicher angenommen werden, dass auch pulsirende Vacuolen in der Systole ganz zu schwinden und durch Neubildung wieder zu erscheinen vermögen. Die nicht näher auf diesen Punkt gerichteten Beobachtungen an Plasmodien sprechen in der That dafür und für Amoeba proteus hat Hofer experimentell den Ersatz der pulsirenden Vacuole nachgewiesen (vgl. p. 193).

Damit ist aber natürlich nicht ausgeschlossen, dass sich, wie normale Vacuolen, in anderen Fällen auch pulsirende Vacuolen durch Theilung vermehren[1]). Und ebenso wie die Hautschicht in Euglenen und Infusorien ein in hohem Grade differenzirtes Organ vorstellt, mag es auch Vacuolen geben, die eine grössere Individualisirung und Selbstständigkeit erlangten. Möglich, dass solches für manche pulsirende Vacuolen zutrifft, vielleicht auch hier und da für die sogenannten Nahrungsvacuolen[2]) einiger Infusorien. Solche bestimmte, zur Aufnahme und Verdauung fester Nahrung dienende Vacuolen sind im Plasmodium der Myxomyceten nicht vorhanden. Sofern aber ein Körper im Innern des Plasmodiums Lösung erfährt, wie es für nutzbare Nahrung nöthig ist, wird er aus gleichen Gründen häufig in eine Vacuole eingebettet werden, wie das früher besprochene Vitellin.

---

1) Solches wurde bei Flagellaten beobachtet von Klebs, Unters. a. d. botan. Institut zu Tübingen 1883, Bd. I, p. 249, 280. Vgl. übrigens Fisch, Zeitschr. f. wiss. Zoologie 1885, Bd. 42, p. 58.

2) Vgl. Bütschli, Protozoa 1889, p. 1404.

Digitized by Google

III. Die Vacuolen der Protoplasmakörper im Allgemeinen.

Nach der Gesammtheit unserer Erfahrungen kann man nicht daran zweifeln, dass die Protoplasten verschiedener Organismen, bei aller specifischen Differenz, doch in den allgemeinsten Eigenschaften principiell übereinstimmen. Eine derartige Übereinstimmung ist auch bezüglich der Plasmahaut stets angenommen worden und man darf gewiss mit vollem Recht die für Plasmodien gewonnenen Erfahrungen ihrer Hauptsache nach auf die Protoplasmaorganismen anderer Pflanzen übertragen[1]). Demgemäss sind allgemein Hautschicht und Vacuolenhaut als Organe des Protoplasmakörpers anzusehen, die aus dem Cytoplasma unter den an der Grenzfläche des Cytoplasmas bestehenden Bedingungen (wenigstens in Wasser) gebildet und erhalten werden. Thatsächlich ist auch in principieller Hinsicht kein Unterschied zwischen der Plasmahaut der Plasmodien und anderer nackter oder mit Zellwand umkleideter Zellen bekannt. Auch sind alle Erfahrungen mit dem gekennzeichneten heterogenen Ursprung vollständig zu vereinen, ja sprechen zum Theil entschieden dafür, während keines der für Autonomie angeführten Argumente der objectiven Kritik Stand zu halten vermag. So durchschlagende Beobachtungen freilich wie für die Plasmodien stehen mir für andere Zellen nicht zu Gebote, in welchen die für die Untersuchungsmethode bedeutungsvollen Eigenschaften der Plasmodien, nämlich die Aufnahme beliebiger Fremdkörper und die Mächtigkeit des Protoplasmas, bis dahin nicht in brauchbarer Weise zur Verfügung stehen.

Bei solcher Sachlage ist es geboten in Kürze darzulegen, dass für die von de Vries angenommene Autonomie der Hautschicht und Vacuolenhaut kein Beweis erbracht ist und im Vereine damit dasjenige zu kennzeichnen, was für Übereinstimmung mit den Plasmodien spricht.

Zuvörderst sei wiederum allgemein daran erinnert, dass weder aus der realen Existenz, noch aus den damit verknüpften Functionen,

1) Auch de Vries hat so gehandelt. Vgl. z. B. Jahrb. f. wiss. Botanik, Bd. XVI, p. 506.

noch aus der Erhaltung von Continuität ein bestimmter Schluss in unseren Fragen gezogen werden kann[1]). Denn die fertig vorhandene Hautschicht trägt in keiner Weise ein directes Zeugniss für die Art ihrer Entstehung an sich, von der Existenz aber und nicht von dem Modus der Entstehung hängt die functionelle Thätigkeit und Bedeutung ab. Die bei schnellem und ansehnlichem Flächenwachsthum erhaltene Continuität ist aber leichter bei Neubildung aus dem Cytoplasma, als bei autonomer Bildung zu verstehen. Auch spricht die directe mikroskopische Beobachtung nur für einen Zusammenhang von Hautschicht, resp. Vacuolenwand mit dem Cytoplasma. Aber selbst wenn die Plasmahaut sich bis zur vollen Abtrennung individualisirte, würde daraus doch nicht auf Autonomie zu schliessen sein, die auch Niemand für Zellkern, Zellhaut oder Chlorophyllkörper fordert, weil sie als differenzirte Körper uns entgegentreten. Schon in dieser Erwägung ist klar, dass ebenso wenig aus chemischer und physikalischer Qualität wie aus einer Isolirung ein Argument für die Autonomie der Plasmahaut abgeleitet werden kann. Und wenn die plasmolytisch isolirte Vacuolenhaut auch auf der bisher mit dem Cytoplasma verbundenen Seite scharf begrenzt erscheint, so ist das als eine Folge der Neubildung von Plasmahaut an der freigelegten Fläche ebensowohl zu verstehen, wie die zweifellose Neubildung von Hautschicht oder Vacuolenhaut bei Myxomyceten. Ebenso gut wie die Plasmahaut vermögen überhaupt abgetrennte und für sich nicht existenzfähige Theile des Protoplasmakörpers im isolirten Zustand für gewisse Zeit die bekannten plastischen Eigenschaften des Protoplasmas zu bewahren, bis endlich Erstarrung eintritt.

Ist auch das soeben Gesagte eigentlich selbstverständlich, so glaubte ich es doch hier besonders hervorheben zu müssen, weil öfters von de Vries, und von den seiner Anschauung Folgenden, Erhaltung der Continuität, Isolirung und überhaupt mit Existenz der Plasmahaut gegebene Verhältnisse mehr oder weniger als Belege für Autonomie der Hautschicht oder der Vacuolenwand verwandt wurden.

Nach Obigem kann aber natürlich auch aus der Erhaltung der Continuität der Plasmahaut durch ein Zusammenschliessen dieser nicht auf Autonomie geschlossen werden. Unrichtigerweise hat aber de Vries

1) Vgl. Pfeffer, Unters. a. d. botan. Institut zu Tübingen, Bd. II, p. 316 ff.

Digitized by Google

ein solches Zusammenschliessen bei plasmolytischer Zerfällung des Protoplasmakörpers (vgl. Taf. I, Fig. 6) und bei Zerschneiden z. B. von Vaucheria zu Gunsten seiner Hypothese herbeigezogen[1]. Ein solches Zusammenschliessen kann übrigens, wie schon früher mitgetheilt wurde (p. 194), ebenso auch an Plasmodien herbeigeführt werden und ergiebt sich für andere Zellen entweder als eine mechanische Nothwendigkeit oder, bei dem Durchschneiden, als einfachstes Mittel, um z. B. das Protoplasma wiederum um den Zellsaft als continuirlichen Schlauch zu vereinen[2]. Übrigens ist nicht ausgeschlossen, dass bei der letztgenannten Vereinigung von Schnitträndern eine Neubildung von Hautschicht aus dem Cytoplasma mithelfen kann, und die Beobachtungen von Klebs[3] und Hanstein[4] sprechen eher für als gegen solches Zusammenwirken.

Eine bestimmte Schlussfolgerung ist auch nicht aus den bisherigen Beobachtungen an den aus Vaucheria hervortretenden Plasmaballen zu entnehmen. Denn wenn auch thatsächlich die anscheinend nur aus Körnerplasma bestehenden Portionen sich mit Hautschicht umgeben, so war doch in den bisherigen Versuchen eine gewisse Mitgift von Hautschicht nicht unbedingt ausgeschlossen und schliesslich könnte ja diese auch aus den im Innern vertheilten Tonoplasten abgeleitet werden. Jedenfalls aber sucht de Vries mit Unrecht die vorliegenden Thatsachen zu Gunsten der Autonomie der Hautschicht zu deuten und in diesem Sinne sich auch auf das Zugrundegehen einzelner der abgetrennten Plasmaportionen zu berufen. Denn ein Fortleben und Weiterbilden wird durch die Existenz der Hautschicht nicht allein bedingt und die bezüglichen Versuche ergeben, dass auch solche Plasmaballen zu Grunde gehen können, die unter Abschnürung der Hautschicht gebildet wurden und mit Zellkern versehen sind[5].

---

1) Jahrbücher f. wiss. Botanik 1885, Bd. XVI, p. 494.

2) Das Zusammenneigen der Schnittränder ergiebt sich nach der durch das Öffnen herbeigeführten Aufhebung des osmotischen Drucks im Zellsaft als nothwendige Folge der gebotenen Verhältnisse.

3) Unters. a. d. bot. Institut zu Tübingen 1888, Bd. II, p. 510. — Bezüglich der Plasmodien vgl. diese Abhandlung, p. 194.

4) Botanische Abhandlungen 1886, Bd. IV, Heft 2, p. 49.

5) Vgl. de Vries, Jahrb. f. wiss. Bot. 1885, Bd. 16, p. 494; Intracellulare Pangenesis 1889, p. 138; Klebs, l. c., p. 507; Pfeffer, ebenda, p. 323. — Bezüglich der Plasmodien vgl. diese Abhandlung p. 194.

Digitized by Google

Für die Autonomie der Vacuolenhaut wird von de Vries[1]) als durchschlagendes Argument die von Went[2]) näher verfolgte ganz allgemeine Verbreitung von Vacuolen und deren Vermehrung durch Theilung irrigerweise angesehen. Denn mit beiden Thatsachen ist doch nicht ausgeschlossen, dass neben den bestehenden Vacuolen neue entstehen, wie es ja in den Plasmodien empirisch nachgewiesen wurde, und die Frage ob und wenn solche Neubildung im Protoplasma ausgeschlossen ist, hat Went nicht einmal einer kritischen Erwägung unterzogen[3]). Mit der unzweifelhaften Neubildung kann es sich also nur darum handeln, in wie weit durch diese oder durch Theilung die Zahl der Vacuolen vermehrt wird, deren Anzahl anderseits durch Verschmelzungen mit kleineren oder grösseren Vacuolen (Zellsaft) vermindert wird[4]).

Schwer zu verstehen ist auch, wie Went[5]) den zuweilen ungleichen Inhalt der verschiedenen Vacuolen einer Zelle als einen Beweis für autonome Abstammung der Vacuolen zu stempeln sucht, also wiederum fälschlich aus einer Function auf genetische Entstehung schliesst. Mit solchem Hinweis habe ich hier wohl nicht nöthig, die Gründe näher anzuführen, die ebensowohl in benachbarten Vacuolen, wie in benachbart liegenden Zellen zu ungleicher Anhäufung von Stoffen führen. Übrigens haben wir früher auch Mittel kennen gelernt, um in einem Plasmodium Vacuolen mit ganz verschiedenem Inhalt herzustellen.

Mit dieser kurzen Kritik, die nebensächliche Dinge nicht berührte, ist wohl genügend gezeigt, dass durch die herbeigezogenen Thatsachen die Autonomie der Hautschicht und Vacuolenhaut nicht ein-

---

1) Pangenesis 1889, p. 126, 156.

2) Jahrb. f. wiss. Botanik 1888, Bd. 19, p. 295 und 1890, Bd. XXI, p. 299; Botan. Ztg. 1889, p. 197. — Über pulsirende Vacuolen vgl. diese Abhandlung p. 223. — Eine allgemeine Verbreitung von kleinen Vacuolen ist übrigens nie geleugnet worden. So hat sogar Nägeli (Theorie d. Gährung 1879, vgl. Pfeffer, Physiologie Bd. I, p. 32) die Trübung von Protoplasten zum Theil auf kleine Vacuolen geschoben (wass indess nur in beschränktem Maasse richtig ist). Eine Theilung von Vacuolen ist seit Verfolg der Zelltheilungen bekannt und in diesen zum Theil eine Nothwendigkeit. Theilungen der Vacuolen durch plasmolytische Contractionen sind seit 1854 durch Pringsheim und Nägeli bekannt.

3) Vgl. Pfeffer, Oxydationsvorgänge in lebenden Zellen 1889, p. 465.

4) Vgl. diese Abhandlung p. 223.

5) L. c., p. 348.

Digitized by Google

mal wahrscheinlich gemacht wird[1]. Allerdings können wir aus Obigem auch keinen sichern Beweis für eine Neubildung der Plasmahaut entnehmen und für solche sind zur Zeit durch directe Beobachtung an den von Zellhaut eingeschlossenen Protoplasmakörpern nur Wahrscheinlichkeitsgründe beizubringen.

Fernere Untersuchungen werden zweifellos unsere Frage auch für hautumkleidete Plasmakörper durch directe Beobachtungen definitiv entscheiden können und in technischer Hinsicht dürfte z. B. die Einführung löslicher fester Körper in das Protoplasma solcher Zellen erreichbar sein[2]. Ohne experimentelle Eingriffe vermag aber die directe Beobachtung nur schwierig ganz entscheidende Resultate zu geben, wie auch schon bei Besprechung der Plasmodien angedeutet wurde (p. 215). Denn wenn das Auftreten einer Vacuole den Eindruck einer Neubildung macht, so steht zur Rettung der hypothetischen Autonomie es doch immer offen, den Ausgangspunkt der Vacuole in zuvor unsichtbare Tonoplasten zu verschieben, die heutigen und künftigen optischen Hülfsmitteln unzugänglich sind.

Es gilt dieses ebensowohl für den intacten Protoplasmakörper, als für die bekannte Vacuolisirung, welche ausgetretene Protoplasmaballen beim Wegwaschen der umgebenden Lösung (Zucker oder andere Stoffe) erfahren[3]. Häufig handelt es sich hierbei um Ausdehnung vorhandener Vacuolen[4], von denen man in anderen Fällen durchaus nichts zu entdecken vermochte, bis dann mit dem Quellen eine oder einige Vacuolen auftreten, die für das Auge als Neubildungen erscheinen[5].

Übrigens ist solche sehr ansehnliche Vergrösserung oder auch

---

1) Demgemäss ist auch ohne Bedeutung der an sich ungerechtfertigte Versuch van Tieghem's, die Vacuolen den Chromatophoren anzuschliessen und sie mit diesen als Leuciten zusammenzufassen (Referat in Botan. Centralblatt 1890, Bd. 41, p. 262).

2) Vgl. die vorige Abhandlung p. 168. — Nach Klercker (Studien über Gerbstoffvacuolen 1888, p. 49) scheinen ausgeschiedene Gerbstoffkörnchen um sich eine Vacuole zu bilden. Jedenfalls macht die Entstehung solcher Gerbstoffvacuolen den Eindruck von Neubildung, wenn auch die Frage, ob der Gerbstoff zunächst in fester Form ausgeschieden wurde, bei Seite gelassen wird.

3) Vgl. Pfeffer, Physiologie I, p. 35.

4) Auf stete Vergrösserung wird die Erscheinung allein zurückgeführt von Went, l. c., p. 334.

5) Über Ursachen der Vacuolenbildung vgl. diese Abhandlung p. 220.

Digitized by Google

Verkleinerung der Oberfläche von Hautschicht und Vacuolenhaut — die ja auch an ganzen Protoplasten durch plasmolytische Wirkung resp. deren Aufhebung zu erreichen ist — mit der Autonomie der Plasmahaut nur sehr gezwungen zu vereinen. Denn wenn die Plasmahaut in kurzer Zeit um mehr als das 40fache in die Fläche wächst, ohne dass der hyaline Saum der Hautschicht anscheinend an Dicke abnimmt[1]), so muss man schon zur Rettung der Autonomie der Plasmahaut ein ungemein schnelles Wachsthum dieser annehmen, ein Wachsthum, das schliesslich zur fast völligen Umwandlung des Cytoplasmas in Plasmahaut führt. Denn bei kleineren Plasmaballen kommt es wohl vor, dass endlich eine Vacuole mit dünner hautartiger Umhüllung vorliegt, welche unter Umständen an einer Stelle etwas mächtiger ist und an dieser noch feine Körnchen als Reste des Cytoplasmas, und wenn sie vorhanden waren, auch Chlorophyllkörner einschliesst. Bei solcher Verdünnung kommt übrigens schliesslich auch eine Vereinigung der zuvor durch Cytoplasma getrennten Hautschicht und Vacuolenhaut zu stande[2]).

Sind die soeben mitgetheilten Thatsachen geeignet, die Neubildung der Plasmahaut aus Cytoplasma sehr wahrscheinlich zu machen, so sind wiederum die Beobachtungen an den Wurzelhaaren von Trianea bogotensis mit solcher Neubildung gut vereinbar. Lässt man diese Wurzelhaare 1 bis 2 Stunden in Methylenblaulösung (0,001 %) verweilen[3]), und unterzieht sie dann sogleich der Beobachtung, so

1) Vgl. Pfeffer, Osmotische Untersuchungen 1877, p. 131. Hinsichtlich der diosmotischen Eigenschaften auch ebenda p. 127. In den Osmot. Untersuchungen sind auch Beweise dafür erbracht, dass es sich bei solcher Ausdehnung um eine plastische Gestaltung, nicht um eine elastische Dehnung handelt, auf die de Vries (Jahrb. f. wiss. Bot. XVI, p. 529, 538) die Veränderungen in der Grösse der Oberfläche späterhin schob. Vgl. dazu Pfeffer, Unters. a. d. bot. Institut zu Tübingen, Bd. II, p. 320. Auch diese Abhandlung, Kap. V.

2) Zu weiteren Schlüssen führen auch nicht die oft weitgehenden Zerfällungen des Protoplasmas, welche durch extreme Temperaturen, durch Ammoniak, electrische Entladungen u. s. w. erreichbar sind. (Vgl. Pfeffer, Physiologie Bd. II, p. 385, 391.) — Auch die durch Methylviolett und Fuchsin erzielbaren Vacuolen mögen hier nur als Thatsache erwähnt werden. (Vgl. Unters. a. d. botan. Institut in Tübingen Bd. II, p. 255, 264.)

3) Pfeffer, Unters. a. d. bot. Institut zu Tübingen Bd. II, p. 186 und Taf. II, Fig. 5.

Digitized by Google

trifft man gelegentlich, ausser dem Zellsaft, auch die kleinen Vacuolen im Protoplasma alle gefärbt. Bei Aufenthalt in Wasser können aber dann schon nach einer Viertelstunde einzelne farblose kleine Vacuolen aufgetaucht sein, die also zuvor in diesen Grössen sicher nicht anwesend waren (denn der Farbstoff exosmirt nicht), von denen man aber nicht sicher wissen kann, ob sie nicht durch Vergrösserung von Vacuolenanfängen hervorgingen.

Da somit alle Thatsachen mit einer Entstehung der Plasmahaut aus dem Cytoplasma gut vereinbar sind, und verschiedene Beobachtungen sogar für solche Neubildung sprechen, so kann es wohl keinem Zweifel unterliegen, dass die Erscheinungen über das Wesen der Entstehung der Plasmahaut bei Plasmodien auf alle Pflanzen auszudehnen sind. Diese Erfahrungen haben aber allgemein die Autonomie der Plasmahaut widerlegt und es bedarf deshalb in dieser Hinsicht keines speciellen Eingehens auf die Hautschicht im Gegensatz zur Vacuolenwand. Es mag also die Bemerkung genügen, dass beide, wenigstens in jüngster Zeit, von de Vries[1]) als zwei von einander unabhängige, sich autonom fortpflanzende Organe angesprochen wurden, während in früheren Untersuchungen diese supponirte beiderseitige Unabhängigkeit nicht bestimmt hervorgehoben ist.

Hautschicht und Vacuolenhaut sind übrigens in den Plasmodien nicht etwa in einem geringeren Grade differenzirt und individualisirt, als bei höheren Pflanzen. In letzteren pflegt sogar wenigstens der sichtbare Hyaloplasmasaum in geringerem Grade hervorzutreten und bei den Plasmodien sind Hyaloplasma und Hautschicht befähigt, Gestaltungen auszuführen, welche den nicht amöboiden Zellen abgehen, auch wenn der Protoplast nicht mehr der Zellhaut angepresst ist. Hinsichtlich der Vacuolen müssen wir es dahin gestellt lassen, ob etwa die pulsirenden Vacuolen als eine etwas höher individualisirte Qualität anzusprechen sind. Übrigens stimmen die relativ stationären Vacuolen der Plasmodien, resp. deren Plasmahaut mit Vacuolen gleicher Grösse in höheren Pflanzen überein und in diesen giebt es bekanntlich Zellen, welche nur kleine Vacuolen führen. Auch muss allgemein in Primordialzellen die osmotische Leistung der Vacuolenflüssigkeit sich in Werthen halten, welchen die Cohäsion der Proto-

---

1) Pangenesis 1889, p. 129, 156.

Digitized by Google

plasten genügenden Widerstand zu leisten vermag. Mit Einführung löslicher Substanzen steigt aber ebenfalls in den Plasmodien die osmotische Kraft in den sich demgemäss vergrössernden Vacuolen, und wenn man sich vorstellt, dass ein auf diese Weise ausgedehntes Plasmodium gegen eine umschliessende Zellwand angepresst wird, so würde damit das Bild einer turgescenten Zelle mit schaumigem Protoplasma erreicht (vgl. p. 200 und Taf. II, Fig. 1).

Mit besagter Übereinstimmung gilt also für die Plasmahaut aller Pflanzen in genetischer Hinsicht das, was schon mit Rücksicht auf die Myxomyceten erörtert wurde (p. 216). Für die Plasmahaut (Hautschicht und Vacuolenhaut) sind demgemäss nur an der freien Oberfläche die Bedingungen für Entstehung und Erhaltung gegeben, mit der Rückführung ins Innere aber hört die Existenz dieses Organs auf und die Baumaterialien vertheilen sich im Cytoplasma, können aber mit der Rückkehr an die Grenze von neuem zur Plasmahaut zusammentreten. Es verhält sich damit wie etwa mit Menschen, die mit der Beorderung an die Grenze besondere Dienste zu leisten haben, mit der Rückkehr aber die alten Beschäftigungen wiederum aufnehmen.

Natürlich muss nicht jedes beliebige Theilchen des Cytoplasmas zum Aufbau dieses Grenzwalls geeignet sein, vielmehr scheinen allgemein, wie bei den Myxomyceten, die Mikrosomen nicht in die Plasmahaut einzutreten, der auch Zellkern und Chlorophyllkörper nicht beitreten.

Wenn somit das nach Abzug der körnigen Einschlüsse bleibende Hyaloplasma das Baumaterial für die Plasmahaut liefern muss, so ist doch mit solcher Abstraction immer nur eine gewisse Einengung erreicht. Denn das Hyaloplasma ist ebenfalls wieder ein in unbekannter und wohl in sehr complexer Weise aufgebautes Ganzes und es muss uns eher wahrscheinlich dünken, dass nicht die ganze hyaline Plasmamasse zum Eintritt in den Grenzwall befähigt oder bestimmt ist. Auch ist uns völlig unbekannt, in welcher Weise und in welchem Sinne die aus der Plasmahaut ins Innere zurückkehrenden Theile sich vertheilen und functioniren. Jedenfalls werden sie irgendwie im Dienste des Ganzen sich bethätigen und es ist auch denkbar, dass sie wiederum in den Aufbau anderer nach Zeit und Verhältnissen veränderlichen und vergänglichen Organcomplexe ein-

Digitized by Google

treten. So gut wie die Hautschicht, sind auch andere in ähnlicher Weise vergängliche und doch nöthigenfalls stetig vorhandene Organe möglich und die Existenz solcher steht in vollem Einklang mit der Auffassung des Protoplasten als eines Organismus, dessen Fähigkeiten und Leistungen aus dem Zusammenwirken seiner bleibenden oder veränderlichen und nicht unbedingt deutlich differenzirten Theile resultirt, Complexen, deren Grösse recht wohl unter die Grenze optischer Wahrnehmung sinken kann[1]).

Mag also immerhin nur ein Theil des Cytoplasmas zur Formirung von Plasmahaut befähigt sein, so bleibt diese deshalb doch eine Neubildung und ist dieserhalb in keiner Weise in genetischer Hinsicht mit Zellkern und Chromatophoren zu vergleichen. Wie diese wird natürlich jeder Organismus, und so auch das Cytoplasma, durch Descendenz erhalten, und nicht in dieser allgemeinen Continuität, sondern in der dauernden selbständigen Differenzirung besteht das Wesen der Autonomie, die übrigens für Zellkern und Chromatophoren, trotz aller Theilungsthätigkeit, ihre sichere Begründung erst mit dem insbesondere für den Zellkern gelieferten Nachweis erhielt, dass das isolirte Cytoplasma diese gleichsam symbiotisch in ihm lebenden Organe nicht aus sich zu bilden vermag.

In den beschriebenen Neubildungen der Plasmahaut aus dem Cytoplasma ist durchaus kein Zusammentreten differenzirter Theile zu erkennen und so fehlt von vornherein eine empirische Berechtigung für die Hypothese von de Vries, welche übrigens im Anschluss an die ermittelte Autonomie von Zellkern und Chromatophoren aufgestellt wurde. Die directe Beobachtung lehrt aber, dass um Asparaginkrystalle die Vacuolenhaut plötzlich und als Folge der eingeleiteten Lösung an jeder Stelle im Cytoplasma entstehen kann und dass bestimmt dabei eine Aufnahme in eine Vacuole nicht eintritt. Eine solche Aufnahme wäre überhaupt nur in Vacuolen von genügender Grösse möglich und die hypothetischen unsichtbaren Vacuolenanlagen (Tonoplaste) müssten zunächst zu wahrnehmbaren Grössen heranwachsen, bevor sie den ansehnlichen Fremdkörper aufnehmen könnten.

Hat de Vries für die hypothetischen Tonoplasten nur eine Erweiterung zu einer Vacuole angenommen, so lassen unsere Erfah-

1) Vgl. Pfeffer, Oxydationsvorgänge 1889, p. 86.

Digitized by Google

rungen doch auch ersehen, dass nicht etwa durch Aneinanderreihung jener die Plasmahaut hervorgeht. Denn nachgewiesenermassen ist um einen Asparaginkrystall vor Einleitung der Lösung keine Vacuolenhaut vorhanden (p. 215), während sie aber entsteht, werden die unmittelbar benachbarten kleinsten und grösseren Vacuolen nicht in Mitleidenschaft gezogen. Wirken also die kleinsten noch sichtbaren Vacuolen bei der Formirung der Plasmahaut nicht mit, so kann man solche Betheiligung auch nicht für noch kleinere Tonoplasten annehmen, die überhaupt nur einer ungerechtfertigten Hypothese zu Gefallen gefordert werden können. Da ferner, wie früher (p. 229) besprochen, bei Vacuolisirung kleiner Plasmaportionen das Cytoplasma bis auf kleine Reste schnell zur Plasmahaut werden kann, so müsste man consequenterweise auch das Cytoplasma wesentlich aus Tonoplasten aufgebaut sein lassen, würde also damit auf Identität von Hyaloplasma und Tonoplasten geführt.

Bei der gekennzeichneten genetischen Beziehung zwischen Plasmahaut und Cytoplasma ist natürlich ein gegenseitiger Austausch der aufbauenden Theile zwischen beiden möglich, während die Plasmahaut dauernd in Continuität erhalten bleibt. Eine solche Continuität ergiebt sich, wie schon hervorgehoben wurde (p. 194, 226), als nothwendige Folge der Entstehung der Plasmahaut an der Grenzfläche, und aus dieser ununterbrochenen Erhaltung in allem Wechsel der Gestaltung kann selbstverständlich nicht die Autonomie im Sinne von de Vries gefordert werden, mag es sich nun um ein Zusammenschliessen an Wunden, um Abschnürungen oder um Zelltheilung[1]) handeln. Eine vollständige Neubildung der gesammten Hautschicht, die ein gänzliches Entfernen der bisherigen voraussetzt, kommt so in normalen Verhältnissen vielleicht nie vor, es sei denn, dass die Hautschicht einmal abgestreift oder verlassen wird[2]). Ebenso muss bei einer Vereinigung von Protoplasten die Hautschicht immer geschlossen bleiben, auch wenn gleichzeitig dabei aufbauende Theile in das Cytoplasma zurücktreten (vgl. p. 196 für Myxomyceten).

Dagegen ist eine vollständige Neubildung von Vacuolenhaut im

1) Vgl. dazu de Vries, Pangenesis 1889, p. 131.

2) Vgl. dazu, mit Bezug auf die Vacuolenhaut, Schmitz, Structur d. Protoplasmas u. d. Zellkerne 1880, p. 9. (Separat a. d. Sitzungsber. d. niederrhein. Gesellschaft.)

Digitized by Google

Innern des Cytoplasten normalerweise nicht nur recht wohl möglich, sondern thatsächlich auch für Myxomyceten erwiesen und die Beobachtungen an anderen Protoplasten sprechen nur dafür, dass in gleicher Weise Vacuolen neu auftauchen. In welchem Verhältniss Neubildung und Theilung zur Vermehrung der Vacuolen beitragen, das habe ich in keinem Falle zu ermitteln gesucht, doch wird das Verhältniss sicher specifisch ungleich ausfallen. Sollten aber in einem Protoplasten normalerweise alle Vacuolen durch Theilung ihren Ursprung nehmen, so ist doch damit keineswegs die Autonomie der Vacuolenhaut irgendwie erwiesen. Dass aber bei Reduction des Protoplasmas auf dünnen Wandbelag mit der Theilung der Zelle auch eine solche der grossen Vacuole (des Zellsaftes) stattfindet, ist jedenfalls nur zweckentsprechend, ja fast eine mechanische Nothwendigkeit, doch ist damit das Neuauftauchen kleiner Vacuolen keineswegs ausgeschlossen. Ganz entsprechend solcher Neubildungsfähigkeit vermag nach Hofer Amoeba Proteus in einem abgetrennten Stück wohl die fehlende pulsirende Vacuole, nicht aber den fehlenden autonomen Zellkern herzustellen (p. 223).

Die Fähigkeit der Plasmahaut, allen Ausgestaltungen des Protoplasten, gleichsam wie eine zähflüssige Masse, zu folgen, steht im Zusammenhang mit der leichten gegenseitigen Verschiebbarkeit der jeweils aufbauenden Theile und der Fähigkeit des Cytoplasmas, da, wo es Flächenvergrösserung erfordert, neues Baumaterial einzuschieben, aber auch solches bei Abnahme der Oberfläche wieder in sich aufzunehmen. Ein solcher Wechsel wird damit angezeigt, dass bei weitgehendster Vergrösserung oder Verkleinerung der Oberfläche die Plasmahaut anscheinend gleiche Dicke bewahrt. Möglich ist es also auch, dass bei Stabilität der Gestalt dennoch die aufbauenden Theile im Austausch mit dem Cytoplasma wechseln. Eine bestimmte Einsicht in diese Verhältnisse fehlt zur Zeit allerdings, doch ist gut denkbar, dass solcher Wechsel in dem einen Falle vielleicht ausgedehnt und möglicherweise im Dienste bestimmter Functionen sich abspielt, während in einem andern Falle der Aufbau der Plasmahaut mehr oder weniger stationär verharrt.

Als Resultante aus diesen antagonistischen Wirkungen, der Formirung der Plasmahaut an der Grenzfläche und ihrer Rückführung in das Innere, können beide nicht wohl scharf von einander abge-

Digitized by Google

grenzt sein. Eine bestimmte Abgrenzung ist auch, wie seit MOHL und PRINGSHEIM bekannt, zwischen sichtbarem Hyoloplasmasaum und Körnerplasma nicht zu finden und beide vermögen sich, besonders schön bei Plasmodien, unter den Augen des Beobachters ineinander zu verwandeln (Kap. II). Übrigens kann man nicht fordern, dass ein ansehnlicher Hyaloplasmasaum seiner ganzen Masse nach als Plasmahaut anzusprechen ist, die, um im Dienste des Organismus und speciell in diosmotischen Vorgängen entscheidend wirksam zu sein, schliesslich auf eine Molekularschicht reducirt sein könnte. Schon dieserhalb muss, bei realer Existenz, die Plasmahaut nicht nothwendigerweise optisch wahrnehmbar sein und eine wahrnehmbare Differenzirung eines Grenzwalls ist nicht jedesmal zu erwarten, wenn der ganze Protoplast nur hyaloplasmatisch aufgebaut ist[1]).

In jedem Falle ist und bleibt die in allem Wechsel sich erhaltende Plasmahaut, wie ich das schon in früheren Arbeiten[2]) hervorhob, ein selbst lebendiges Organ des lebenden Protoplasten, welches im Dienste und in Wechselwirkung mit dem Ganzen zu functioniren hat. In solchem Sinne kann auch die Plasmahaut, neben den allgemein aus der Grenzlage entspringenden Thätigkeiten, in specifisch und zeitlich verschiedener Weise in Anspruch genommen werden und nöthigenfalls weitergehende Änderungen der Qualität erfahren. So ist der äussere Grenzwall des Protoplasten in der Membran, der sog. Cuticula von Euglenen und Infusorien[3]), zu einer festeren und schärfer begrenzten, aber immerhin noch mit dem Protoplasma zusammenhängenden Haut geworden, welche auch besondere sichtbare Structuren auszubilden vermag und wenigstens normalerweise sich nicht mehr in Cytoplasma zurückzuverwandeln scheint. Auch schon in den Plasmodien pflegt die Hautschicht, einschliesslich des an-

---

1) Zu gleichen Schlüssen kam ich schon früher, Osmotische Untersuchungen 1877, p. 223 ff. Vgl. auch meine Physiologie Bd. I, p. 32 und Unters. a. d. botan. Institut zu Tübingen Bd. II, p. 318.

2) Vgl. Unters. a. d. bot. Institut zu Tübingen Bd. II, p. 321 und die dort citirte Literatur.

3) Vgl. KLEBS, Unters. a. d. bot. Institut zu Tübingen 1883, Bd. I, p. 240; Bot. Zeitung 1889, p. 737. — Möglicherweise entsteht auch die Cellulosemembran durch Umwandlung der Hautschicht.

Digitized by Google

grenzenden Cytoplasma, eine ansehnlichere Cohäsion als in den Zellen höherer Pflanzen zu besitzen und bei letzteren ist normalerweise die Hautschicht relativ ruhend, während die Vacuolenhaut in der Protoplasmaströmung mit bewegt wird (vgl. Kap. V).

Allgemein ist wahrscheinlich, dass mit den specifischen Eigenheiten der Protoplasten verschiedener Pflanzen auch irgend welche qualitative Unterschiede der Plasmahaut im Zusammenhange stehen. Da aber ferner die Entstehung der Plasmahaut von dem Aussenmedium abhängt, so wird auch die Qualität des letzteren Einfluss auf die Eigenschaften der Plasmahaut haben[1]), welche ausserdem unter dem Einfluss des gesammten Organismus Variationen erfahren dürfte. Doch darf man nicht vergessen, dass aus ungleichen Leistungen noch keineswegs mit Nothwendigkeit eine Qualitätsdifferenz der Plasmahaut folgt, da die uns entgegentretenden Erfolge von verschiedenen Factoren abhängen und die potentiellen Fähigkeiten keineswegs jederzeit in Anspruch genommen werden. Dieses ist auch beim Vergleich von Hautschicht und Vacuolenhaut zu beachten, die an demselben Protoplasten schon durch ihre Lage nicht in allen Dingen in derselben Weise functioniren können. Ist doch z. B. nur die Hautschicht dem directen Anprall der von aussen zutretenden Körper ausgesetzt und normalerweise fällt allein der Hautschicht die Production einer umkleidenden Zellhaut zu, sofern eine solche gebildet wird. Indess scheint der Vacuolenhaut die Fähigkeit der Production von Cellulose nicht abzugehen. Wenigstens scheinen nach Pringsheim[2]) die Cellulinkörner an der Vacuolenhaut ihren Ursprung zu nehmen und entweder durch diese, oder direct innerhalb des Protoplasmas, dürften die Cellulosehüllen entstehen, welche sich nicht allzuselten um Krystalle von Calciumoxalat finden[3]).

Es ist indess hier nicht der Platz, die angedeuteten Fragen weiter auszumalen, welche mit Bezug auf diosmotische Verhältnisse späterhin nochmals gestreift werden (Kap. VI). Ebenso ist es nicht Absicht, auf die Arbeitstheilung im Protoplasten einzugehen, in welchem

---

1) Vgl. p. 215, wo der Nachweis geführt wurde, dass um Asparagin zunächst keine Plasmahaut von gleicher diosmotischer Qualität wie um Vacuolen besteht.

2) Bericht d. botan. Gesellschaft 1883, p. 294.

3) Vgl. vorige Abhandlung p. 178.

Digitized by Google

auch die Plasmahaut als ein mit bestimmten Functionen betrauter Grenzwall betheiligt ist. So wie aber die Plasmahaut wieder zu innerem Cytoplasma werden kann, so dürfte auch die functionelle Arbeitstheilung der zum Aufbau beider befähigten Theile keine strenge sein und in der Plasmahaut mögen wohl z. B. neben der aufnehmenden Thätigkeit Athmung und Stoffumsatz fortdauern. Überhaupt ist das Wesen der Arbeitstheilung im Protoplasma nicht in der Bewahrung fixer Lage zu suchen, die selbst distincte und selbständige Organe wie Zellkern und Chlorophylkörner nicht einhalten, sondern in den trotz aller räumlichen Verschiebung fortbestehenden Wechselwirkungen zwischen bleibenden und veränderlichen Organen und Bausteinen[1]).

Die Plasmahaut konnte in ihrer Beziehung zum Protoplasten und als ein Organ dieses behandelt werden, da der Nachweis für das allgemeine Vorhandensein dieses differenten und doch nicht scharf abgegrenzten Grenzwalls an anderer Stelle erbracht wurde[2]). Immerhin dürfte hier ein kurzer Hinweis auf die wesentlichsten diesbezüglichen Argumente geboten sein, da die mitgetheilten Erfahrungen

1) Vgl. Pfeffer, Zur Kenntniss d. Oxydationsvorgänge 1877, p. 86. Bei aller Anerkennung der functionellen Differenz distincter und zum Theil auch in Beweglichkeit verschiedener Schichten des Protoplasmas, halte ich es doch für ungerechtfertigt in Pflanzenzellen etwa eine strenge schichtenweise Sonderung in Athmungsplasma, Ernährungsplasma anzunehmen, wie Brass will (vgl. Unters. a. d. bot. Institut in Tübingen, Bd. II, p. 316) oder mit de Vries (Jahrb. f. wiss. Bot., Bd. XVI, p. 495) die Hauptaufgabe des Körnerplasmas allein im Transport von Nährstoffen zu suchen. Auch kann ich mit Noll (Naturwiss. Rundschau 1888, p. 41, 57, vgl. auch Arbeiten d. botan. Instituts in Würzburg 1888, Bd. III, p. 532) nicht allein oder wesentlich nur der ruhenden Hautschicht active Gestaltungskraft beimessen. Sehr bemerkenswerth ist die Hervorhebung der relativen Ruhe der Hautschicht mit Bezug auf Wachsthumsvorgänge, wenn auch nicht zu verkennen ist, dass solche selbst durch dauernd bewegtes Plasma in localisirter Weise wohl ausführbar erscheinen. Auch treffen natürlich die von aussen kommenden Körper zunächst die Hautschicht, die wohl auch vielfach das Reize percipirende Organ sein mag, ohne dass dieses allgemein der Fall sein muss. (Vgl. dazu auch Unters. a. d. botan. Institut zu Tübingen Bd. II, p. 650.)

2) Pfeffer, Osmotische Untersuchungen 1877, p. 121 ff. Vgl. ferner meine Physiologie Bd. I, p. 81, 43 und namentlich auch Unters. a. d. botan. Institut zu Tübingen 1886, Bd. II, p. 315.

Digitized by Google

wenigstens in einer Hinsicht einen weiteren Aufschluss gewähren. An den bezeichneten Stellen, übrigens auch in dieser Abhandlung, ist schon dargethan, dass die Plasmahaut sich der directen Wahrnehmung vollständig entziehen kann, während doch allgemein die Separation mit dem Absterben des übrigen Protoplasmas die Existenz eines verschiedenen Grenzwalls nachweist, den ausserdem auch die diosmotischen Verhältnisse fordern.

Es ist klar, dass schon die Grenzschichten des Protoplasten, also Hautschicht und Vacuolenhaut, darüber entscheiden, ob ein gelöster Körper seinen Weg ins Innere findet und ebenso kommen in alleiniger Berührung mit diesem Grenzwall die osmotischen Leistungen der nicht eindringenden Stoffe zu Wege. Sofern aber ein gelöster Körper die Plasmahaut durchdringt, verbreitet er sich auch in dem Cytoplasma, das schon durch seine Bewegung, insbesondere bei lebhafter Plasmaströmung, für schnelle Verbreitung des eingetretenen Stofftheilchens sorgt. Thatsächlich scheinen auch alle Körper, deren Eindringen in die Plasmahaut constatirt wurde, ihren Weg bis in die Vacuolenflüssigkeit zu finden, soweit nicht besondere Umstände, wie z. B. Speicherung im Plasma, ein Hemmniss bilden (vgl. Kap. VI). Dieser Erfolg könnte freilich auch bei gleicher diosmotischer Qualität von Plasmahaut und Cytoplasma zu stande kommen. Doch ist für die Plasmahäute eine schwierigere Permeabilität deshalb zu fordern, weil die Imbibitionsflüssigkeit des Protoplasmas offenbar auch Stoffe gelöst enthält, welche nicht exosmiren. Am augenscheinlichsten würde ein solches Verhalten demonstrirt werden, wenn es gelänge, in das Protoplasma farbige lösliche Körper zu bringen, welche durch die Hautschicht nicht zu diosmiren vermögen; jedoch ein solcher Versuch, der mit Plasmodien vielleicht ausführbar ist, steht mir nicht zu Gebote.

Indess folgt aus anderen Erfahrungen immerhin, dass in dem Cytoplasma gewisse Stoffe schnell diffundiren, welche nur relativ langsam die Vacuolenhaut passiren. Es ist nämlich in dieser Abhandlung (p. 221) gezeigt worden, dass sich unter Umständen Kryställchen von Asparagin (ebenso von Gyps oder Vitellin) auflösen, ohne dass es zur Bildung einer Vacuole kommt. Da aber eine solche Lösung innerhalb einer Vacuolenhaut eine Vergrösserung der Vacuole auf osmotischem Wege hervorruft, so ist aus diesen Erfahrungen

Digitized by Google

nicht nur, wie früher dargethan, der Mangel einer Vacuolenhaut für solche Fälle abzuleiten, sondern auch weiter zu entnehmen, dass sich das gelöste Asparagin schnell in dem Cytoplasma verbreitet. Denn träfe dieses nicht zu, käme vielmehr dem Cytoplasma eine mit der Plasmahaut übereinstimmende geringere Permeabilität zu, so müsste auch ohne eine Plasmahaut durch solche Lösung eine Ansammlung osmotisch wirksamer Substanz und damit eine Vacuole zu stande kommen. Ja eine nur stark gehemmte Diffusion im Cytoplasma würde aus den früher angeführten Gründen voraussichtlich zur Abgrenzung einer Vacuolenhaut resp. zur Entstehung einer Vacuole führen.

Fordert die bekannte relative Impermeabilität der Plasmahaut, die auch für viele krystalloide Körper zutrifft, eine sehr geringe Grösse der intermicellaren Räume, so dürfte dagegen das Cytoplasma sich etwa wie erstarrte Gelatine verhalten, in der die Diffusionsbewegung ungefähr wie in Wasser fortschreitet[1]). Dabei sind die obigen Erwägungen unabhängig von chemischer Qualität und näherem Aufbau der Plasmahaut[2]) und des Cytoplasmas. Wenn übrigens dieses z. B. ein Gerüstwerk mit wässeriger Zwischenflüssigkeit vorstellen sollte, so wäre schon dieserhalb zur Erreichung der diosmotischen Eigenschaften ein Abschluss des Protoplasmas mit einer continuirlichen Plasmahaut nothwendig.

Dass die Plasmahaut schon für sich die erwähnten diosmotischen Eigenschaften besitzt, findet Bestätigung in Versuchen, welche auf eine Isolirung der Plasmahaut hinauslaufen. Zudem folgt aus der ungleichen Resistenz, dass das Cytoplasma eine Grenzschicht verschiedener Qualität besitzt.

Eine derartige Separation gelingt, indem bei längerer Plasmolyse oder schneller unter dem Einflusse verdünnter Säure das umschlossene Plasma abstirbt und nun der Verbreitung gelöster Stoffe kein Hinderniss bereitet, während innere und äussere Plasmahaut ihre Continuität und wenigstens zunächst ähnliche diosmotische Eigenschaften wie

1) Vgl. dazu Pfeffer, Osmotische Untersuchungen 1877, p. 138; Voigtländer, Diffusion in Agargallerte in Zeitschrift f. physikal. Chemie 1889, Bd. 3, p. 335.

2) Diese ist aus den besprochenen Gründen auch dann dauernd erhalten, wenn sie, wie die Vacuolenhaut, die Protoplasmaströmungen mitmacht.

Digitized by Google

zuvor bewahren[1]). Diese Erfahrungen, ferner die bei weitgehender Vacuolisirung von Plasmaballen gleichsam isolirt erhaltene Plasmahaut (vgl. p. 229) lieferten mir, im Vereine mit den diosmotischen und anderweitigen Eigenschaften des intacten Protoplasten, die Mittel, um allgemein die Existenz der Plasmahaut zu erweisen, d. h. eines differenten, stets continuirlichen Grenzwalls, durch dessen Eigenschaften die diosmotischen Verhältnisse der Zelle bestimmt und regulirt werden.

In jüngerer Zeit erzielte de Vries[2]) eine Isolirung der Vacuolenhaut, indem er durch plötzliche und energische plasmolytische Wirkung die Hautschicht und das übrige Cytoplasma zum Absterben brachte. Die so isolirte Vacuolenhaut ist übrigens dem Wesen nach gleichwerthig mit der schon erwähnten Plasmahaut, welche schliesslich bei weitgehender Vacuolisirung als einzige Hülle eine Vacuole umschliesst[3]). Beide bewahren zunächst in vollem Maasse die plastische, zähflüssige Beschaffenheit und vermöge dieser können sie auch ihre Oberfläche vergrössern oder verkleinern, ja selbst bei entsprechender Einwirkung Verschmelzungen oder Theilungen ausführen. Aus diesem, ja nicht einmal eine active lebendige Thätigkeit

---

1) Späterhin operirte ich auch unter gleichzeitiger Anwendung des stets diosmirenden Methylenblau, welches Absterben des Cytoplasmas durch Färbung dieses anzeigt. (Vgl. Unters. a. d. bot. Institut zu Tübingen Bd. II, p. 317.)

2) Jahrb. f. wiss. Botanik 1885, Bd. 16, p. 465. Die so isolirte Plasmamasse ist natürlich nun auch auf der zuvor noch freien Seite scharf begrenzt (vgl. p. 225). Auch dürfte dieses isolirte Product öfters noch andere Plasmatheile in sich aufnehmen, da der hyaloplasmatische Saum um den lebenden Protoplasten gelegentlich entschieden weniger mächtig ist, wie die plasmolytisch isolirte Vacuolenhaut. (Vgl. auch Berthold, Protoplasmamechanik 1886, p. 152.) Auch habe ich wohl bei längerer plasmolytischer Wirkung, ebenso bei längerer Einwirkung von Methylviolett eine Zunahme des Hyaloplasmas beobachtet (vgl. Unters. a. d. Tübinger Institut Bd. II, p. 318 Anmerkung). — Aus solchen plasmolytischen Versuchen ist übrigens nicht auf eine relativ geringere Resistenz der Hautschicht zu schliessen, da diese im Experimente durch ihre Lage unvermittelteren Angriffen ausgesetzt ist, als die Vacuolenhaut.

3) Diese Schlussfolgerung würde selbst bei Annahme von Autonomie der Vacuolenhaut bestehen, da ja nach dieser Hypothese diese Vacuolen aus Tonoplasten hervorgehen. — Aus diesen Versuchen allein kann übrigens gar nicht erwiesen werden, dass das innere Cytoplasma sich in diosmotischer Hinsicht von der Plasmahaut unterscheidet.

Digitized by Google

fordernden Verhalten kann natürlich schon deshalb nicht auf Autonomie geschlossen werden (wie es anscheinend de Vries thut oder that), weil überhaupt die nicht existenzfähigen Plasmamassen gleiches Verhalten bieten, und auch diese endlich ihre plastische Beweglichkeit mit dem Erstarren einbüssen, das man immerhin Absterben nennen kann. Es handelt sich hierbei eben um Vernichtung von Eigenschaften, welche nur im lebendigen Organismus gewonnen und erhalten werden, die aber mit der Zeit erlöschen, wie überhaupt alle die Functionen, welche an isolirten und nicht dauernd existenzfähigen Organen zunächst noch fortdauern[1]). In diesen Erwägungen ist klar, dass ein auf Separation hinzielender Versuch auch dann einen vollgültigen Beweis für die Existenz der Plasmahaut zu liefern vermag, wenn dabei diese in mehr oder weniger erstarrtem Zustand erhalten wird. Dieses ist zumeist bei der vorhin erwähnten Abtrennung der Plasmahaut durch sehr verdünnte Säure der Fall, doch gelingt es in günstigen Fällen, nach dem Absterben des übrigen Cytoplasmas, die beiden ineinander geschachtelten Plasmahäute in einem noch plastischen Zustand zu erhalten, welcher ihnen ein ansehnliches Flächenwachsthum gestattet.

Für meine früheren Zwecke genügte vollständig der allgemeine Nachweis, dass die in der zuletzt angedeuteten Weise separirte Hautschicht und Vacuolenhaut, sowie ebenso die Plasmahaut um isolirte Vacuolen der Hauptsache nach ähnliche diosmotische Eigenschaften wie der lebende Protoplast besitzen. Diese Übereinstimmung wurde mit Bezug auf die isolirte Vacuolenhaut in mehr ins Einzelne gehender Weise von de Vries verfolgt[2]). Bedenkt man übrigens, dass die Plasmahaut im Verbande und im Dienste des lebendigen Organismus Leistungen zu vollbringen hat, zu der sie für sich und in ihrem statischen Zustand nicht befähigt ist, so ist wohl sicher anzunehmen, dass auch in diosmotischer Hinsicht der lebensthätige Protoplast mancherlei zu Wege bringt, wozu die isolirte Plasmahaut nicht befähigt ist.

1) Vgl. dazu Unters. a. d. bot. Institut zu Tübingen Bd. II, p. 323.

2) Dass ohne Zerreissungen die erstarrte Plasmahaut durch molekulare Änderungen durchlässiger wird, wurde im Allgemeinen von mir erkannt (Osmotische Unters. 1877, p. 141). Näher wurde dieses Verhalten, das an dieser Stelle nicht weiter zu berücksichtigen ist, von de Vries studirt. (Jahrb. f. wiss. Botanik 1885, Bd. 16, p. 508, 529.)

Digitized by Google

In historischer Hinsicht muss man unterscheiden: 1) die alleinige Bezugnahme auf eine optisch wahrnehmbare Grenzschicht, 2) den Nachweis allgemeiner Existenz und die Erkennung der Plasmahaut als ein Organ des lebenden Protoplasten, 3) das genetische Verhältniss zum Protoplasma.

Die rein histologische Behandlung konnte in unsern Fragen zu keinem Ziele führen, da die Plasmahaut, wie schon bemerkt wurde, nicht jedesmal optisch wahrnehmbar sein muss und eine Erkennung ihrer physiologischen Bedeutung auf diesem Wege unmöglich ist. Es mag deshalb der Hinweis genügen, dass schon Mohl (1844), Nägeli, Pringsheim (1854) die gelegentliche Wahrnehmbarkeit einer Hautschicht (Hyaloplasmasaumes) und deren unbestimmte Abgrenzung gegen das Körnerplasma erkannten. Nägeli (1855) (theilweise schon früher Hartig) kam zugleich, freilich mehr theoretisch zu der Ansicht, dass sich an der Oberfläche des Protoplasmakörpers allseitig, also sowohl gegen aussen, als gegen den Zellsaft hin, eine hautartige Abgrenzung bilde. Eine solche Annahme ist dann, übrigens unter verschiedener Vorstellung der Qualität dieses Grenzwalls, auf Grund histologischer Beobachtung von verschiedenen Forschern (z. B. Hanstein) vertreten, von andern aber ganz oder theilweise bestritten worden[1]).

Obgleich Nägeli[2]) (1855) die allseitige Abgrenzung des Protoplasmakörpers durch eine hautartige Schicht annahm, und zugleich die besonderen diosmotischen Eigenschaften der Protoplasten in den allgemeinsten Grundlagen in voller Klarheit erkannte (vgl. Kap. VII), sah er doch mit Bezug auf Diosmose das Protoplasma als eine gleichartige Masse an; jedenfalls ist wenigstens in seinen Arbeiten keine Andeutung über eine functionelle Arbeitstheilung zu finden. Weiterhin[3]) führte ich dann in der schon angedeuteten

---

1) Vgl. Pfeffer, Osmot. Untersuchungen 1877, p. 123 ff.; Hofmeister, Pflanzenzelle 1867, p. 3. — Über Körnerplasma und Hyaloplasma vgl. auch diese Abhandlung p. 189.

2) Pflanzenphysiol. Untersuchungen von Nägeli und Cramer 1855, Heft I, p. 9.

3) Osmot. Untersuchungen 1877, p. 121; Physiologie I, p. 31. Nachdem de Vries in den nach 1877 erschienen Arbeiten das Protoplasma in diosmotischer Hinsicht als ein Ganzes behandelt hatte, trat er 1885 (Jahrb. f. wiss. Bot. Bd. XVI, p. 489) der gekennzeichneten functionellen Arbeitstheilung bei, die er merkwürdigerweise als eine neue Entdeckung behandelte (vgl. z. B. p. 542). Ich verweise in dieser Hinsicht auf die Kritik in der Botan. Zeitung 1886, p. 118 und auf die Unters. a. d. botan. Institut zu Tübingen Bd. II, p. 316—324). An diesen Stellen ist auch schon hervorgehoben, dass die isolirte Vacuolenhaut, auf welche de Vries alle seine Schlüsse basirte, für sich nicht einmal den Beweis liefert, dass sich das innere Cytoplasma in diosmotischer Hinsicht different verhält. Ebenso ist gezeigt, dass de Vries unbegreiflicherweise die als Organ des lebendigen Protoplasmas von mir angesprochene Plasmahaut zu einer trockenen Niederschlagsmembran herabzusetzen suchte. Die Berechtigung, ja die Nothwendigkeit, auch die Erstarrungs-

Digitized by Google

Weise den Nachweis, dass der Protoplasmakörper ganz allgemein von einem continuirlichen Grenzwall besonderer Qualität umkleidet wird, der als Organ des lebendigen Organismus für die diosmotischen und osmotischen Vorgänge zunächst entscheidend ist und kennzeichnete so das osmotische System in der Zelle [1]).

Schon Nägeli (l. c.) hatte die plastische, mehr oder weniger zähflüssige Beschaffenheit des ganzen Protoplasmas, einschliesslich der Plasmahaut, betont und es ist schwer zu begreifen, wie, trotz der allbekannten plastischen Eigenschaften des lebendigen Protoplasmas, fernerhin die Plasmahaut von manchen Forschern als eine merklich feste Haut angesprochen werden konnte (von Euglenen, Infusorien ist hier abzusehen). Eine derartige Cohäsion setzte übrigens auch de Vries [2]) voraus, indem er die bedeutenden Dehnungen und Zusammenziehungen des ganzen Protoplasten, und ebenso der isolirten Vacuolenhaut, vorwiegend oder ausschliesslich auf elastische Dimensionsänderungen schob. Thatsächlich werden aber alle diese Dimensionsänderungen wesentlich nur durch die leichte Verschiebbarkeit der aufbauenden Theile, nöthigenfalls unter Mithülfe von Wachsthum auf Kosten des Cytoplasmas in dem schon kurz besprochenen Sinne vermittelt (vgl. p. 234). Eine in den Hauptzügen gleiche Auffassung vertrat ich im Anschluss an Nägeli, in den Osmotischen Untersuchungen, und betonte auch nachdrücklich, dass von einem merklich festen Aggregatzustand der Plasmahaut im lebendigen Organismus nie die Rede sein kann, wenn auch mit Absterben der Plasmahaut (wie im Cytoplasma) ein fester Aggregatzustand erreichbar ist. (Näheres über den Cohäsionszustand in Kap. V.)

Bezüglich des Ursprungs der Plasmahaut verdanken wir wiederum den ersten Erklärungsversuch Nägeli (1855, l. c.), der durch die Wirkung des berührenden Wassers an der Oberfläche des Protoplasmas die Plasmamembran

---

fähigkeit und die erstarrte Plasmahaut entsprechend zu berücksichtigen, bedarf wohl keines Commentars. Und wenn ich auch mit künstlichen Niederschlagsmembranen operirte, so geschah es doch in der ausgesprochenen Absicht (vgl. Vorwort d. Osmot. Unters.), um die fehlenden physikalischen Erscheinungen zu gewinnen, die erst ein fundamentales Verständniss der osmotischen Vorgänge und Leistungen der lebendigen Zelle ermöglichten. Wiederholt und nachdrücklich wurde auch in den Osmot. Unters. betont, dass das genetische Verhältniss der Plasmahaut ohne Belang ist in den Vorgängen, welche nur von der realen Existenz jener abhängen (vgl. auch diese Abhandlung p. 224). Vielleicht hat mangelhaftes Auseinanderhalten dieser Fragen bei de Vries' Interpretationen fremder Leistungen mitgewirkt.

1) Die Polemik Wigand's gegen die Plasmahaut trägt den Thatsachen keine Rechnung und operirt mit unklaren physikalischen und physiologischen Vorstellungen. Vgl. Unters. a. d. bot. Institut zu Tübingen Bd. II, p. 321 Anmerkung.

2) Jahrb. f. wiss. Botan. 1885, Bd. XVI, p. 529, 538. Vgl. dazu Pfeffer, Botan. Zeitung 1886, p. 117.

Digitized by Google

(Hautschicht und Vacuolenhaut) entstehen lässt[1]). Entstehung aus dem Cytoplasma ist wohl weiterhin allgemein angenommen, bis de Vries Hautschicht und Vacuolenhaut in der schon gekennzeichneten Weise (p. 230), analog wie Zellkern und Chromatophoren als nur autonom sich erhaltende Organe ansprach. Dass diese Hypothese unzureichend begründet wurde und durch die Thatsachen wiederlegt wird, ist wohl zur Genüge dargethan worden.

Bei Sicherstellung des Zusammenhanges mit dem Cytoplasma ist doch der Bildungsmechanismus der Plasmahaut noch keineswegs genügend aufgehellt, wie ich das schon früher (1877) hervorhob und wie sich aus dem folgenden Kapitel ergeben wird. In diesem wird sich auch zeigen, dass die Plasmahaut nicht etwa einfach ein physikalisches Spannungshäutchen ist und dass die diosmotischen Verhältnisse nicht durch eine Ölschicht bedingt werden, wie es neuerdings von Quincke angenommen wurde.

IV. Ursachen der Entstehung der Vacuolenhaut.

Mit der behandelten Beziehung zwischen Cytoplasma und Plasmahaut sind die uns entgegentretenden Thatsachen im Allgemeinen verständlich, wenn auch damit noch nicht eine tiefere Einsicht in die näheren Modalitäten und Bedingungen des Bildungsprocesses der Plasmahaut gewonnen sind. Eine völlige Aufhellung in dieser Hinsicht ist überhaupt nicht wohl möglich, so lange die physikalischen, chemischen und bis zu einem gewissen Grade die physiologischen Eigenschaften des Protoplasmas nicht weitergehend aufgehellt sind. Bei der heutigen Sachlage aber muss man sich bewusst sein, wie ich das auch früher nachdrücklichst betonte[2]), dass allenfalls der Rahmen etwas enger begrenzt werden kann und dass man sich mit dem Versuche weiter einzudringen unvermeidlich auf hypothetischen Boden begeben muss.

Wirken, so weit bekannt, die Mikrosomen bei der Bildung der Plasmahaut nicht nothwendig mit, so muss doch schon unbestimmt bleiben, ob das ganze Hyaloplasma oder nur Theile dieses zur For-

---

1) Demgemäss sieht Nägeli in den Vacuolen wässerige Ausscheidungen im Protoplasma und in solchem Sinne sind die Vacuolen, abgesehen von de Vries, wohl allgemein als Bildungen angesehen worden, die an beliebiger Stelle ihren Ursprung nehmen können. Vgl. z. B. Mohl, Grundzüge d. Anatom. u. Physiol. 1857, p. 44; Hofmeister, Pflanzenzelle 1867, p. 5.

2) Osmotische Untersuchungen 1877, p. 128. Vgl. auch Unters. a. d. bot. Institut zu Tübingen, Bd. II, p. 320.

Digitized by Google

mation der Plasmahaut befähigt sind (vgl. p. 231). Aber auch die allgemeine Frage, ob die Plasmahaut nur durch Zusammenschliessen ungelöster Theile, oder unter gleichzeitiger Entstehung solcher aus löslichen Substanzen gebildet wird, ist nicht entscheidend zu beantworten, da die augenscheinliche Existenz gelöster Stoffe im Cytoplasma natürlich für sich noch keinen Aufschluss giebt. Die äusserste Micellschicht der Plasmahaut kann freilich Gelöstes nicht enthalten, das von dem anstossenden Wasser unvermeidlich aufgenommen würde. Andrerseits kann aber auch die Mitwirkung von Gelöstem zur Erreichung der Plasticität nicht gerade gefordert werden, da letztere ebenso noch den dünnsten Plasmahäuten um isolirte Vacuolen zukommt. Trägt so die Plasmahaut in sich die leichte Verschiebbarkeit der Micellen, so spricht wiederum die unter Umständen erhebliche Veränderung des Cohäsionszustandes im Cytoplasma (Kap. V) eher für einen wechselseitigen Übergang zwischen Flüssigem und Festem, und es ist möglich, dass ein solcher Wechsel, den Pfaundler allgemein zur Erklärung des festweichen Aggregatzustandes annimmt, im Cytoplasma eine für die Cohäsion bedeutungsvollere Rolle spielt. So ist auch in solcher Erwägung die Möglichkeit zu ersehen, dass ein im Cytoplasma zeitweise oder dauernd gelöstes Theilchen sich in der Plasmahaut ungelöst erhält und zudem ist bei Colloiden die Grenze zwischen Lösungs- und Quellungszustand nicht immer scharf gezogen[1]).

---

1) Ähnliche Erwägungen wurden auch schon früher von mir angestellt (l. c., 1877, p. 131; vgl. auch Physiologie Bd. I, p. 31) und dabei wurde aufs Bestimmteste hervorgehoben, dass die ganze weitere Discussion von an sich hypothetischen Voraussetzungen ausgehe. In diesem Sinne ist auch die supponirte Mitwirkung gelöster Stoffe genommen. Sollte übrigens irgendwie ein Übergang aus dem gelösten oder flüssigen in einen relativ festen Zustand in der Bildung der Plasmahaut mitspielen, so würde ich keinen Augenblick Anstand nehmen, von einer Niederschlagsmembran oder Niederschlagshaut zu reden. Denn diese Bezeichnung ist bisher nicht für einen ganz bestimmten Bildungsmodus reservirt und ich wenigstens subsumire darunter, ganz unabhängig von Cohäsionszustand und von Leben oder Tod, alle hautartigen Bildungen, die irgendwie und irgendwo durch Ausscheidungen oder Mitwirkung einer solchen an beliebiger Oberfläche oder Contactfläche entstehen. Gegebenen Falles würde ich also auch eine Öllamelle eine Niederschlagshaut nennen. Die Polemik gegen eine Auffassung der Plasmahaut als eine Niederschlagsmembran ist wohl ganz allein der Beschränkung der Vorstellungen auf den einen durch Traube bekannt gewordenen Bildungsmodus entsprungen.

Digitized by Google

Ohne damit einen bestimmten Entstehungsmodus kennzeichnen zu wollen, mag man immerhin die Plasmahaut als verdichtetes Cytoplasma auffassen. Eine relativ dichtere Lagerung der Micellen in der Plasmahaut ergiebt sich aus den diosmotischen Verhältnissen und aus der Isolation der Plasmahaut. Wenigstens wenn die Isolation durch sehr verdünnte Säure erreicht wird, bleibt die Plasmahaut als consistente und zusammenhängende Membran zurück, während das Innenplasma beim Erstarren zu einer porösen Masse wird, auch wohl Zusammenballung erfährt und hiernach ärmer an fester Substanz ist[1]).

Unsere Kenntnisse der chemischen Qualität von Cytoplasma und Plasmahaut sind nicht ausreichend, um Rückschlüsse auf das Verhältniss beider zu gestatten. Thatsächlich ist auch die chemische Natur des Baumaterials der Plasmahaut nicht ausreichend bekannt, doch spricht alles dafür, dass Proteïnstoffe wesentlich beim Aufbau betheiligt sind und die uns bekannten Eigenschaften der Eiweisskörper gestatten wohl auch Bildungsvorgänge, wie sie für die Entstehung der Plasmahaut zu fordern sind[2]). Ob nun diese aus Plastin oder je nach Umständen aus verschiedenen Proteïnstoffen zusammengesetzt ist, lasse ich dahin gestellt, und ebenso ist nicht zu sagen, ob neben den Eiweissstoffen noch andere Körper an der Construction der Plasmahaut Theil nehmen. Trotz dieser Unbestimmtheit lässt sich indess behaupten, dass weder die plastischen noch die diosmotischen Eigenschaften der Plasmahaut durch fettes Öl oder ähnliche Körper bedingt sind. Demgemäss ist auch die Annahme von Quincke[3])

---

1) Optisch wahrnehmbare Structuren sind in der Plasmahaut kaum zu erwarten und die bisher, übrigens nur im Hyaloplasmasaum beobachteten Differenzirungen können auch recht wohl von kleineren Vacuolen oder eingelagerten Körpern anderer Art herrühren. Anders liegt es natürlich, wenn die Plasmahaut, wie in Euglenen, in höherem Grade cohärent und differenzirt wird.

2) Vgl. Pfeffer, Osmotische Untersuchungen 1877, p. 145. Fr. Schwarz (Cohn's Beiträge zur Biologie 1887, Bd. V, p. 166) vermuthet, dass es sich um Plastin handle, einen Körper, der erst nach 1877 dargestellt wurde. Übrigens sprach ich schon damals die Vermuthung aus, dass es sich im Cytoplasma, einschliesslich der Plasmahaut, um einen bisher aus Pflanzen nicht dargestellten Proteïnstoff handeln dürfte. — Die Haut der Euglenen und Infusorien ist noch nicht genügend untersucht. Über die Dotterhülle des Hühnereies vgl. Liebermann, Archiv f. d. gesammte Physiologie 1889, Bd. 43, p. 71.

3) Annal. d. Chemie u. Physik 1888, N. F., Bd. 35, p. 630, 636 u. s. w.

Digitized by Google

irrig, nach welcher die diosmotischen Eigenschaften durch eine dünne Ölhaut bestimmt sein sollen, welche sich durch Oberflächenspannung an der Grenzfläche des Protoplasmas erhält und deren Beweglichkeit durch Aufnahme von Eiweissstoffen vermindert sein kann.

Das schon besprochene Erstarren der Plasmahaut könnte nicht eintreten, wenn der mehr oder weniger zähflüssige Aggregatzustand derselben von Öl herrührte. Da ausserdem die Plasmahaut mit solchem Erstarren und ferner sehr schnell durch etwas Quecksilberchlorid und Jod viel permeabler wird, so kann die diosmotische Regulation in keinem Falle durch Öl bestimmt werden, während diese Erscheinungen sehr wohl mit einem Aufbau aus Eiweissstoffen vereinbar sind[1]).

Würde Öl die Diosmose reguliren, so könnten nur die in diesem löslichen Stoffe passiren und dies ist auch unzweifelhaft Quincke's Ansicht, der in solchem Sinne sich auf einige Körper beruft[2]), ohne aber die Gesammtheit der Erfahrungen über diosmotische Aufnahme in das Protoplasma in Erwägung zu ziehen, welche das Gegentheil schlagend lehren. So finde ich das ungemein schnell durch das lebende Protoplasma diosmirende Methylenblau in Mandelöl und Olivenöl vollständig unlöslich, ebenso aber auch Anilinblau[3]), das gar nicht in die Zelle aufgenommen wird. Sicherlich würde eine Ausdehnung derartiger Vergleiche auf andere Stoffe noch weitere gleichsinnige Argumente liefern. Doch genügt ja dieses eine Beispiel, und mit solcher Erfahrung ist auch eine Ölhaut von nicht wahrnehmbarer Dicke als diosmotisch massgebende Schicht ausgeschlossen.

Quincke hat übrigens die Ölhaut nur aus physikalischen Erfahrungen über Oberflächenspannungen und damit verknüpften Ausbreitungen dem Protoplasma aufgedrängt, ohne die Frage an dem Objecte selbst entscheidend zu prüfen[4]). Eine solche Übertragung ist aber auch rein physikalisch unzulässig, da die Spannung zwischen Öl und der Oberfläche des Protoplasten eine von Quincke in keiner Weise bestimmte Grösse ist und sich durchaus

1) Vgl. Pfeffer, Osmotische Untersuchungen 1877, p. 141, 145; de Vries, Jahrb. f. wiss. Bot. 1885, Bd. 19, p. 553, 562.

2) Vgl. Quincke, l. c., p. 625, 635.

3) Über Diosmose der genannten Farbstoffe vgl. Unters. a. d. botan. Institut zu Tübingen Bd. II, p. 186, 268. Das Öl bleibt immer und dauernd farblos, gleichviel ob man es mit der wässerigen Lösung des Farbstoffes schüttelt oder den Farbstoff trocken hinzugiebt. Nachweislich hat das Öl, auch wenn es Ölsäure enthält, keinen Einfluss auf den Farbstoff, nimmt also solchen nicht etwa als eine farblose Verbindung auf. — Auch Salpeter, Harnstoff, Coffeïn u. a. diosmiren mehr oder weniger durch Protoplasten, obgleich sie, soviel ich weiss, in Öl unlöslich sind.

4) Vgl. auch die Bemerkungen über Protoplasmabewegungen in Kap. V.

Digitized by Google

nicht nach Eiweiss und Öl bemessen lässt, da gelöstes Eiweiss an der äussern Grenzfläche des Protoplasmas nicht existirt und die Qualität dieses uns nicht bekannt ist. Übrigens ist bekannt, dass die Plasmahaut Wasser sehr leicht passiren lässt. Aus dem Vorkommen von Öltröpfchen im Protoplasma ist natürlich in unserer Frage durchaus kein Beweismaterial zu entnehmen. Übrigens werden Öltropfen von Plasmodien aufgenommen, ohne dass beim Contact irgend eine Ausbreitungstendenz sich bemerklich macht. Thatsächlich konnte ich selbst an den zuvor mit Öl in Berührung gebrachten Plasmodien eine Ölhaut weder direct, noch nach Zugabe von Alkanna erkennen. Die Möglichkeit gelegentlicher partieller Ausbreitung von Öl auf der Plasmahaut will ich damit nicht läugnen, ebenso ist nicht ausgeschlossen, dass eine kleinere Ölmenge in der Plasmahaut vorhanden ist, sowie ja diese von Öltropfen passirt werden kann. Die bekannte Einlagerung von ölartigen, wachsartigen und harzartigen Stoffen in die Zellhaut und die damit verknüpfte Herabdrückung der Permeabilität in Cuticula und Kork[1]) musste immer dem Physiologen die Frage aufdrängen, ob vielleicht die diosmotischen Eigenschaften der Plasmahaut in analoger Weise erzielt würden. Da ich aber bei Gelegenheit der osmotischen Untersuchungen die Unzulässigkeit solcher Erklärung erkannte, unterliess ich ein Eingehen auf diese schon damals in Erwägung gezogene Frage.

Wurde die Bildung der Plasmahaut als eine Function der Grenzfläche (wenigstens in Berührung mit Wasser) erkannt, so ist doch diese Function noch weiter in ihre Factoren zu zergliedern. In dieser Hinsicht wurde die Sachlage bereits in den Osmotischen Untersuchungen (p. 129) präcisirt, eine endgiltige Aufhellung ist aber auch heute nicht zu geben.

Zunächst drängt sich allgemein die Frage auf, ob die Entstehung unmittelbar (mechanisch) aus den Wirkungen in und an der Oberfläche resultirt, oder ob ein Reiz oder irgend eine vitale Function mit im Spiele ist. Letzteres ist zwar nicht unbedingt widerlegt, doch in hohem Grade unwahrscheinlich und jedenfalls bedarf es zur Bildung nicht der vollen vitalen Thätigkeit. Denn in beliebigen kleinen Protoplasmastücken (auch kernlosen) vermag Plasmahaut aus Cytoplasma zu entstehen und dieses auch bei Gegenwart von Chloroform und bei Mangel an Sauerstoff[2]). Doch stehen in isolirten und an sich nicht existenzfähigen Theilen nicht alle

1) Vgl. Pfeffer, Physiologie Bd. I, p. 48.
2) Vgl. Osmot. Unters., p. 133.

Digitized by Google

Functionen still[1]) und so kann man nicht mit aller Strenge behaupten, dass unter besagten Verhältnissen keine vitale Einzelleistung mitspielte. Trifft aber solches in vollem Maasse zu, so ist dieserhalb nicht nöthig, dass auch die weiter differenzirte Hautschicht einer Euglena in gleicher Weise unabhängig von lebendiger Thätigkeit entstehen muss. Auch kann die Plasmahaut recht wohl im Leben, sowohl für sich, als im Verband und in Abhängigkeit vom Ganzen, besondere Qualitäten und Fähigkeiten gewinnen.

Sind, wie ja wahrscheinlich, vitale Functionen ausgeschlossen, so muss weiter gefragt werden, ob schon in der freien Oberfläche resp. in den mit dieser zusammenhängenden Molekularwirkungen direct oder indirect die Bedingungen für Entstehung der Plasmahaut gegeben sind, oder ob es dazu noch besonderer Mitwirkung des Aussenmediums bedarf.

Eine bestimmte Entscheidung hat besondere Schwierigkeiten, wenn auch die Plasmahaut nicht ein solches physikalisches Spannungshäutchen ist, wie es an der Grenzfläche homogener flüssiger und zähflüssiger Medien sich nothwendig bildet[2]). Diese veränderten Molekularänderungen können aber recht wohl weitere Folgen haben und wenn dadurch z. B. in Gemischen eine gewisse räumliche Trennung suspendirter oder gelöster Stoffe in der Grenzschicht eintritt, so ist bei der Unbekanntschaft mit der Zusammensetzung des Protoplasmas schwer zu sagen, was hiermit direct oder durch die damit eingeleiteten weiteren Reactionen erreicht wird[3]). Diese Bedingungen ändern sich aber wiederum mit dem anstossenden Medium, da bekanntlich die Oberflächenspannung von der Natur der aneinander grenzenden Medien abhängt.

Deshalb geht aus der schon besprochenen, ohne Vacuolenbildung verlaufenden Lösung eines Asparaginkrystalls im Plasmodium (vgl.

---

1) Vgl. Pfeffer, Physiologie Bd. I, p. 378.

2) Vgl. z. B. Lehmann, Molekularphysik 1888, Bd. I, p. 251 und die dort citirte Literatur.

3) Vgl. dazu Osmot. Untersuchungen p. 130; Untersuchungen a. d. bot. Institut zu Tübingen Bd. II, p. 303. — Ferner vgl. Mendelejeff, Berichte d. chem. Gesellschaft 1886, Bd. 19, p. 456; Fuchs, Beibl. z. d. Annal. d. Physik u. Chemie 1889, Bd. 13, p. 622; Spring, Zeitschrift f. physik. Chemie 1889, Bd. IV, p. 658; v. d. Mensbrugghe, Beibl. zu Annal. d. Physik u. Chemie 1890, Bd. 14, p. 16.

Digitized by Google

p. 221) wohl hervor, dass eine Plasmahaut von der Qualität, wie sie in Berührung mit Wasser entsteht, in der Contactfläche mit Asparagin sich nicht bildet, aber man kann deshalb nicht behaupten, dass etwa eine ausfällende Wirkung des Wassers mit im Spiele sein muss, da voraussichtlich auch die Oberflächenspannung des Protoplasmas in der Berührungsfläche mit Asparagin einen anderen Werth hat, als in der Berührungsfläche mit Wasser. Möglich ist indess eine solche von der Oberflächenspannung nicht unmittelbar abhängige Wirkung des Wassers, und nach bekannten Eigenschaften von Proteïnstoffen ist es recht wohl denkbar, dass eine Ausscheidung dieser an der Grenzfläche durch Entziehung des Lösungsmediums erreicht und damit, oder unter Mitwirkung dieses Vorgangs, die Continuität der Plasmahaut erzielt, zugleich aber auch die Entfernung des Lösungsmediums aus dem Cytoplasma vermieden wird[1]).

In allen angedeuteten Fällen ist aber die Natur der Grenzfläche von der Qualität des anstossenden Mediums abhängig und so lässt sich nicht von vornherein sagen, ob etwa das Protoplasma gegen Öltropfen, Oxalatkrystalle oder andere Körper nur ein einfaches Spannungshäutchen bildet oder eine weitergehende Abgrenzung erfährt[2]). Zugegeben, dass so eine Plasmahaut entsteht, so kann deren Aufbau doch Differenzen gegenüber der an Wasser stossenden Plasmahaut bieten und bisher sind nur für letztere die diosmotischen Verhältnisse studirt, welche derzeit weit mehr als optische Wahrnehmung ein Indicium für den molekularen Aufbau abgeben. Mit dieser Abhängigkeit von dem anstossenden Medium ist auch denkbar, dass schon

1) Eine Entstehung durch Fällung an der Grenzfläche nahm schon Nägeli an (Pflanzenphysiol. Untersuch. 1855, Heft 1, p. 9). Näher behandelte ich diese Frage in Osmot. Untersuchungen 1877, p. 132, 146). Fr. Schwarz (Cohn's Beiträge zur Biologie 1887, Bd. V, p. 166) glaubt, dass es sich speciell um Ausscheidung von Plastin handle, das in dem Protoplasma durch Alkalien und Phosphate gelöst gehalten werde. Ebenso nimmt Hansen (Flora 1879, p. 408) an, dass im Protoplasma Proteïnstoffe im gelösten und gequollenen Zustande enthalten sind. Übrigens wurden die Ursachen der Lösung von Proteïnstoffen von mir bei Gelegenheit der Untersuchungen der Proteïnkörper behandelt (Jahrb. f. wiss. Botanik 1872, Bd. 8, p. 491). — Über differente Eigenschaften des reinen und salzfreien Albumins vgl. auch Harnack, Berichte d. chem. Gesellschaft 1889, p. 3050.

2) Dieses gilt ebenso für die an Luft befindlichen Plasmakörper. Vgl. Osmot. Untersuchungen, p. 129.

Digitized by Google

mit der Natur der wässerigen Lösung die Eigenschaften der Plasmahaut in etwas modificirt werden und wahrscheinlich spielen auch derartige Einwirkungen in den Functionen des Organismus gelegentlich eine Rolle.

Dass aber die Plasmahaut kein einfaches physikalisches Oberflächenhäutchen sein kann, wie solches an der Grenzfläche homogener Flüssigkeiten entsteht[1]), ist schon aus den Isolirungsversuchen zu entnehmen, welche mit dem Erstarren die Plasmahaut als eine feste Membran von messbarer Dicke liefern. Mit einem einfachen Flüssigkeitshäutchen könnte ausserdem nicht wohl erreicht werden, dass die Grenzschicht so viele Stoffe nicht diosmiren lässt, welche im inneren Cytoplasma leicht diffundiren. Auch kann die zuweilen so sehr mächtige Entwickelung des sichtbaren Hyaloplasmasaumes in Plasmodien nicht der einfache directe Ausdruck der Oberflächenspannung sein, wenn auch daraus kein entscheidender Beweis in unseren Fragen abzuleiten ist[2]). Endlich mag auch nochmals daran erinnert werden, dass die Plasmahaut in weiterer Differenzirung bei Euglenen und Infusorien zu einer bestimmt abgegrenzten und festen Membran wird.

---

1) Vgl. dazu Osmotische Untersuchungen p. 129. — Die Auffassung der Plasmahaut als ein physikalisches Spannungshäutchen in älterer Literatur, so bei Hofmeister (Pflanzenzelle 1867, p. 3), M. Schultze (Protoplasma d. Rhizopoden u. d. Pflanzenzellen 1863, p. 58) entspricht einem ohne nähere physikalische und physiologische Erwägung hingeworfenen Gedanken. Dieses gilt ebenso für die Annahme von Kühne (Unters. über d. Protoplasma 1864, p. 34, 71) und Strasburger (Studien über Protoplasma 1876, p. 29, 38), welche die Grenzfläche theilweise nur Spannungshäutchen, theilweise eine weiter differenzirte Schicht sein lassen. Dass die Plasmahaut nicht einfaches Spannungshäutchen sein kann, sprach auch Berthold aus (Protoplasmamechanik 1886, p. 151).

2) Hierbei kommen Diffusionswirkungen u. s. w. mit in Betracht und so ist auch schon in todter Masse ein hyaliner Saum um eine Emulsion möglich. (Vgl. Bütschli, Structur d. Protoplasmas 1889, p. 5. Separat aus Verhandl. d. naturh. medic. Vereins zu Heidelberg.) In lebensthätigem Protoplasma treten noch anderweitige Momente hinzu und die Separirungen, Schichtungen u. s. w. im Protoplasten sind nicht mehr so einfache Vorgänge, wie in todten Massen. (Vgl. dazu Berthold, Protoplasmamechanik 1886, p. 130 ff.)

Digitized by Google

Bezüglich des Zellkerns der Chromatophoren u. s. w. ist die Sachlage im wesentlichen schon in den Osmotischen Untersuchungen (p. 147) gekennzeichnet. Speciell die im Zellsaft befindlichen Vacuolen erhielten ihre Umhüllung wohl der Regel nach im Cytoplasma, doch mag, wie allgemein, mit besonderem Inhalt, wie Gerbsäure u. s. w., die Qualität der Plasmahaut Besonderheiten bieten.

Da an der Grenzfläche zweier sich nicht mischender Medien allgemein ein physikalisches Oberflächenhäutchen entsteht, muss ein solches auch an der Contactfläche des Cytoplasmas mit Zellkern oder Chromatophor vorhanden sein, doch ist damit die Existenz einer Plasmahaut noch nicht gefordert. Wenigstens an dem Zellkern ist, wenn auch nicht in allen Entwickelungsstadien, eine membranartige Abgrenzung optisch wahrnehmbar[1]), deren diosmotische Eigenschaften aber noch nicht weiter studirt sind. Die scharfe Abgrenzung und das Getrenntbleiben fordert natürlich keine Plasmahaut, wenn anderseits auch von dieser allein es nicht abhängt, ob lebendige Protoplasten sich vereinigen oder durchdringen[2]).

Die in lebendigen Protoplasten vorhandenen Abgrenzungen sind natürlich nicht schlechthin nach dem Verhalten von Zellkern oder Chromatophor in Wasser zu beurtheilen. Diesem gegenüber verhalten sich beide in ähnlicher Weise wie das Cytoplasma, und die Chlorophyllkörper z. B. erfahren weitgehende Vacuolisirung[3]), welche in gleicher Weise wie dieser Vorgang in ausgetretenem Cytoplasma zu beurtheilen ist, wenn auch immerhin die Qualität des Baumaterials des Ganzen und der Plasmahaut Unterschiede bieten mag.

Nach Went[4]) sollen diese Vacuolen in keiner Weise mit den im Cytoplasma vorkommenden vergleichbar sein, ein Ausspruch, der allerdings durch keine annehmbaren Gründe gestützt wird. Natürlich würde nichts dagegen zu sagen sein, wenn Went diese Vacuolen deshalb pathologisch nennen will, weil solche normal im Chlorophyllkorn nicht vorkommen. Freilich muss es

1) Vgl. Zimmermann, Morphologie u. Physiologie d. Pflanzenzelle 1887, p. 31; ferner Unters. a. d. bot. Institut zu Tübingen Bd. II, p. 519 und die an diesen Stellen citirte Literatur. — Auch die Controverse, ob die sog. Kernmembran dem Nucleus oder dem Cytoplasma angehört, ist nicht mit der nöthigen Kritik geführt. Nöthigenfalls haben auch beide eine Plasmahaut.

2) Vgl. auch die vorige Abhandlung p. 154, 174.

3) Vgl. Nägeli und Schwendener, Mikroskop 1877, II. Aufl., p. 550.

4) Jahrb. f. wiss. Botanik 1888, Bd. 19, p. 341.

Digitized by Google

fraglich erscheinen, ob letzteres richtig ist, da Schimper[1]), in anderen Chromatophoren wenigstens, vacuolenähnliche, den Farbstoff enthaltende Räume nachwies und einen ähnlichen Aufbau der Chlorophyllkörner für möglich hält. Gleichviel wie übrigens diese Vacuolisirung von Chromatophoren oder Zellkern zu deuten ist, jedenfalls wird davon die genetische Beziehung der Vacuolenhaut zum Cytoplasma nicht berührt.

V. Aggregatzustand des Protoplasmas.

Vermag ich auch nicht die Cohäsion des Protoplasmas genauer nach Maass und Zahl zu bestimmen, so dürften doch einige Beobachtungen, wenigstens für concrete Fälle, eine annähernde Vorstellung über jene geben. Dieserhalb dürfte ein kurzes Eingehen auf dieses Thema geboten sein, da auch schon die dem gesammten Protoplasten zukommende Cohäsion für alle diejenigen Fragen von Bedeutung ist, welche, wie in Bewegungs- und Gestaltungsvorgängen, mit activen Leistungen oder mit Widerständen des Protoplasmas zu rechnen haben, Fragen, in denen allerdings das über die Cohäsion schon Bekannte öfters nicht richtig gewürdigt ist.

Seit Mohl, der zuerst das Protoplasma kennen lernte, stimmen alle Beobachter darin überein, dass die lebensthätigen vegetabilischen Protoplasten keine ansehnliche Festigkeit besitzen[2]). Speciell bei Umkleidung mit Zellhaut pflegt das Protoplasma mehr oder weniger zähflüssig oder allenfalls etwas gallertartig zu sein, doch erreicht bekanntlich die wahrscheinlich der Hautschicht entsprechende Membran bei Euglenen und Infusorien erhebliche Cohäsion[3]). Diese kann auch relativ ansehnlich in Plasmodien für die peripherischen Schichten werden, welche das zähflüssige bewegliche Innenplasma um-

1) Untersuchung über die Chlorophyllkörper 1885, p. 103, 154.

2) Mohl, Botan. Zeitung 1846, p. 94; Vegetabil. Zelle 1851, p. 42. Ferner z. B. Nägeli, Pflanzenphysiol. Unters. 1855, I, p. 3 und Mikroskop II. Aufl., p. 397, 548; Hofmeister, Pflanzenzelle 1867, p. 69; Pfeffer, Physiologie Bd. I, p. 35 und Osmot. Untersuchungen p. 153, 169; Berthold, Protoplasmamechanik 1886, p. 85 u. s. w.

3) Es wird hier nur lebendiges, mit Wasser durchtränktes Protoplasma beachtet. Ebenso wird auch keine Rücksicht auf festere Gebilde genommen, wie sie namentlich im Thierreich aus dem Protoplasma hervorgehen können.

Digitized by Google

kleiden. Ferner sind die Körper der Samenfäden, sowie die Cilien an diesen und an anderen Schwärmzellen Beispiele für einen etwas festeren Aggregatzustand, der in diesen Fällen ohnehin durch die Lebensweise und die Function gefordert wird.

Die Plasmodien sind aber ein ausgezeichnetes Object, um zu verfolgen, wie unter constanten Bedingungen das festere ruhende und das zähflüssige strömende Protoplasma sich wechselseitig in einander verwandeln können, eine Verwandlung, die, gleichviel welche Ursachen ihr zu Grunde liegen, doch mit Rücksicht auf die Cohäsion mit der abwechselnden Verflüssigung und Erstarrung von Gelatine verglichen werden kann. Bewegt sich die Cohäsionsänderung in andern Protoplasten zumeist wohl in engeren Grenzen, so ist doch die an Plasmodien constatirbare Thatsache von fundamentaler Bedeutung für das Verständniss des Aggregatzustandes des Protoplasmas. Denn leichte Verschiebbarkeit der Theile, die geradezu allgemein als eine Eigenschaft und ein Symptom lebendiger Thätigkeit uns entgegentritt und nothwendig ist, ist nicht nur in dem zähflüssigen Protoplasma gewahrt, sondern auch in dem zeitweilig festeren Protoplasma, in welchem die Fähigkeit der Verflüssigung schlummert. So können denn auch die Plasmodien, trotz zeitweilig starrer Hülle, sich ohne Aufwand grösserer mechanischer Kräfte ausgestalten und unter Umständen sich überhaupt wie zähflüssige Massen verhalten. Ebenso ist aber, falls in anderen Pflanzen die Plasmahaut oder auch angrenzende Schichten ansehnlichere Cohäsion erreichen sollten, doch die besprochene plastische Bildsamkeit nicht verloren, welche unter Mitbetheiligung des Cytoplasmas weitgehende Ausdehnung und Zusammenziehung gestattet (p. 245).

Die Gesammtcohäsion ergiebt sich natürlich als Resultirende der einzelnen Theile. In dieser Hinsicht handelt es sich aber nicht nur um den Gegensatz von äusseren und inneren Schichten, sondern um die näheren Organe und Bausteine überhaupt, von denen uns einzelne, wie Zellkern, Chromatophoren, Mikrosomen distinct entgegen treten. Diese inhomogene Beschaffenheit soll indess zunächst nicht berücksichtigt werden, während unser Augenmerk auf die Cohäsion des ganzen Protoplasten oder auf den diesbezüglichen Gegensatz innerer und äusserer Schichten gerichtet ist. Jedenfalls ist aber klar, dass die zähflüssige oder plastische Beschaffenheit in

Digitized by Google

keinem Falle ein fest zusammenhängendes, dauernd starres Gerüste im Protoplasma zulässt[1]).

Zwischen flüssigem und festem Zustande giebt es alle möglichen Übergänge sowohl für homogene Körper, als für Gemische, und so lassen die Bezeichnungen jedenfalls einen Spielraum für den Aggregatzustand und die Cohäsion[2]). Mit zähflüssig oder schleimig soll also, dem üblichen Sprachgebrauch entsprechend, nur gesagt sein, dass die innere Reibung zwar gegen Leichtflüssigkeit gesteigert ist, aber doch schon durch die Schwere eine Verschiebung der Theilchen möglich ist. Dass dieses erst durch gewissen Kraftaufwand erreicht wird, soll durch weich, gallertartig, plastisch gekennzeichnet werden. Diese Ausdrücke werden hier ohne jede Voraussetzung über die inneren Ursachen und also in einem anderen Sinne als bei Pfaundler[3]) benutzt, welcher den weichen Zustand durch wechselseitigen

1) Vgl. auch Pfeffer, Physiologie Bd. I, p. 36. — An anderen Stellen (vgl. z. B. Zur Kenntniss d. Oxydationsvorgänge 1889, p. 86) habe ich genugsam hervorgehoben, dass ich den Protoplast als einen aus functionell differenten Theilen aufgebauten Organismus ansehe. Möglicherweise differenziren sich auch in rückwandelbarer Weise Theile des Cytoplasmas und es ist sogar wahrscheinlich, dass innerhalb des Cytoplasmas sich Partien ungleicher Cohäsion oder Dichte ausbilden, die unter Umständen direct oder an fixirten Präparaten optisch wahrnehmbar werden. Ich vermuthe, dass auf solche Weise, nöthigenfalls auch unter Mitwirkung räumlich verschiedener Vertheilung der Mikrosomen u. s. w., ein Theil der bisher beobachteten bezüglichen Structurverhältnisse zu stande kommt. Im Grunde genommen handelt es sich dabei um analoge Vorgänge, wie sie uns bei Formation von Hyaloplasma und relativ festen Protoplasmaschichten entgegentreten.

Den Cohäsionswechsel müssen wir als Thatsache hinnehmen, ohne ihn causal aufhellen zu können. Wie schon an früherer Stelle (p. 234) bemerkt wurde, muss auch unentschieden bleiben, ob es sich bei solchem Wechsel um gelöste oder um gequollene Körper handelt. Nähere Kenntnisse der Proteïnstoffe und der Ursachen, welche den Wechsel des Aggregatzustandes in Colloiden bedingen, liefern vielleicht einmal den Schlüssel für besagte Erscheinungen. Die Erstarrung von Gelatine kann übrigens daran erinnern, dass mit Zunahme der Cohäsion nicht nothwendig eine Abnahme des Wassergehalts verknüpft sein muss, der übrigens im Protoplasma überhaupt schwanken kann.

Will man das Protoplasma mit Rücksicht auf die Vertheilung differenzirter Theile in einem homogen erscheinenden Medium einer Emulsion vergleichen (Berthold, l. c., p. 64), so ist dagegen nichts einzuwenden. Für die Einsicht in das Wesen des Organismus ist damit nicht mehr gewonnen, als wenn man etwa Blut eine Emulsion nennt.

2) Vgl. z. B. Mousson, Physik 1871, Bd. I, p. 23; Müller, Lehrbuch d. Physik 1879, VIII. Aufl., Bd. II, 2, p. 133.

3) Sitzungsber. d. Wiener Akadem. 1876, Bd. 83, Abth. 2, p. 249.

Digitized by Google

Übergang der Theile aus dem festen in den flüssigen Zustand erklärt und von Flüssigkeit durchtränkte Gemische, wie Thon, plastisch nennt.

A. Beobachtungen am Plasmodium der Myxomyceten.

In Anpassung an die zellhautfreie Lebensweise besitzt das Plasmodium der Myxomyceten eine verhältnissmässig ansehnliche Cohäsion, die sich auch direct durch den Widerstand kund giebt, welchen das Plasmodium einem Zuge entgegensetzt.

Da aber der strömende, zähflüssige Theil des Körnerplasmas eine grössere Festigkeit nicht besitzen kann, so muss letztere wesentlich dem ruhenden Theil zufallen. Dieser besteht in Strängen zuweilen nur aus Hyaloplasma, meist aber schliesst sich letzterem, wenigstens in den ihre äussere Form bewahrenden Strängen, Körnerplasma an. Dieses bildet dann die Begrenzung des strömenden Körnerplasmas, das so mit einer ruhenden Hülle bis zu 0,01 mm Dicke (gelegentlich auch noch mehr) umgeben ist (Fig. 7, 8). Indess auch in Strängen, welche die äusseren Umrisse bewahren, sind die Ufer veränderlich. Gelegentlich sieht man die ruhende Schicht an Mächtigkeit abnehmen, während sie an anderen Stellen zunimmt, indem das einemal festes Plasma flüssig, das anderemal flüssiges fest wird. Seltener treibt wohl auch einmal ein erstarrter Ballen Körnerplasma mit fort, der gewöhnlich schnell abschmilzt und bald verschwunden ist. Dasselbe Spiel ist aber ebenso zu beobachten in flächenförmig ausgebreiteten Plasmodien, in welchen sich strömende Kanäle in ruhenden Schichten in bekannter Weise finden. In diesen kann dann durch allmähliche, aber auch durch schnelle Verflüssigung der Trennungsschicht die Vereinigung zweier Ströme erfolgen und ferner können neue Ströme in ruhendem Körnerplasma entstehen.

Hiermit sind zunächst nur Thatsachen mitgetheilt, welche schon de Bary [1]) erkannte. Vermuthete dieser auch schon Differenzen der Cohäsion, so ging er doch nicht weiter auf letztere ein und thatsächlich könnte der beschriebene Erfolg, ohne Unterschied der Cohäsion, erreicht werden, sofern nämlich das Bewegte sich wie eine Meeresströmung im Ocean verhielte. Dagegen sprechen freilich

1) Mycetozoen 1864, II. Aufl., p. 45.

Digitized by Google

schon die wellig begrenzten Ufer, welche die Reibung des strömenden Plasmas auszuhalten vermögen, bestimmteren Aufschluss aber gewährt der Widerstand gegen Zug- und Druckkräfte, welche durch die vom strömenden Plasma mitgeführten grösseren Körper ausgeübt werden. Derartige Beobachtungen wurden an Chondrioderma difforme mit festen Körpern, Vacuolen und durch Alkanna gefärbten Öltropfen angestellt[1]).

Wir haben hier zunächst nur die gerade ruhenden, nicht etwa die in Ausgestaltung begriffenen Plasmaschichten im Auge. Für diese ruhenden Schichten ergab sich, dass sie allen durch die Stromkraft entwickelten Druck- und Stosswirkungen vollständig gewachsen sind. So kam kein Mitreissen des ruhenden Ufers und kein Hervorwölben der umhüllenden ruhenden Schicht nach aussen zu stande, wenn Körner von Carmin, Indigo, Zinnober u. s. w. gegen die Wandschicht getrieben oder mit Mühe durch den engen strömenden Kanal eines dünnen Plasmodiumstranges gezwängt wurden.

Öltropfen und Vacuolen, welche im Körnerplasma, sofern deformirende Wirkungen fehlen, die Kugelform bewahren, werden beim Durchpressen durch engere Strömungskanäle entsprechend deformirt, um, wie ein elastischer Ball, sofort wieder die Kugelform zu erreichen, sobald die Erweiterung des strömenden Plasmas solches erlaubt (vgl. Fig. 7, 8, auch 2 und 3). Die Form des Ufers bestimmt also durchaus die stets entsprechend wechselnde Gestaltung der passirenden Öltropfen oder Vacuolen, und diese werden so, wenn die Verhältnisse es mit sich bringen, gelegentlich zu Cylindern mit gewölbten Endflächen, deren Länge den Durchmesser um das 4 bis 6fache übertrifft oder werden geigenförmig eingeschnürt (vgl. Fig. 7 *c*), ja sogar gelegentlich in zwei Vacuolen getrennt (vgl. p. 218). Solche Deformationen finden z. B. auch dann noch statt, wenn der Strömungskanal nur 0,005 mm Durchmesser hat und also die freien Endflächen der Vacuolen entsprechend kleine Krümmungsradien annehmen.

Den so entwickelten Druck- und Reibungswirkungen leistet das ruhende Plasma vollständig Widerstand. Denn selbst wenn diese Umhüllung auf eine dünne, etwa 0,003 mm mächtige Hyaloplasmazone sinkt, bemerkt man weder eine Erweiterung des Kanals, noch

1) Über Aufnahme dieser Öltröpfchen vgl. die vorige Abhandlung p. 152.

Digitized by Google

ein locales Hervortreiben nach aussen. Ebenso weicht das ruhende Körnerplasma, selbst wenn es ansehnliche Mächtigkeit erreicht, nicht aus, ja sogar locale Leisten, oder kegelförmige abgerundete Vorsprünge des ruhenden Plasmas erhalten sich, während sie entsprechende Deformation des passirenden Öltropfens (oder der Vacuole) veranlassen. Auch genügt bei flächenformigem Plasmodium eine 0,005 mm mächtige ruhende Körnerschicht, um die in besagter Weise erzielten Druckentwickelungen zu tragen, denn andernfalls würde diese Trennungsschicht gegen das benachbarte strömende oder ruhende Plasma getrieben.

Im Allgemeinen passiren die Fremdkörper mit der Plasmaströmung, also relativ schnell, doch kommt es auch vor, dass jene während der Ruhepause, welche mit der Umwendung der Strömung verknüpft ist, länger auf einem Punkte verweilen oder auch, dass schnell auf einander Vacuolen, Öltropfen oder feste Körper, eventuell auch diese abwechselnd hindurchgetrieben werden. Aber auch bei so verlängerter oder dauernd wiederholter Reibung erwies sich das ruhende Plasma in schon besagter Weise widerstandsfähig und damit ist auch zugleich gesagt, dass Reibung und Druck durch flüssige oder feste Körper[1]) nicht als ein Reiz wirkt, welcher Verflüssigung des relativ starren Plasmas zur Folge hat[2]). Natürlich gilt dieses Alles nur innerhalb der Versuchsgrenzen und wir werden noch erfahren, dass ein dauernder Zug oder Druck von genügender Intensität thatsächlich andere Erfolge haben kann. Ferner ist zu beachten, dass der wechselseitige Übergang zwischen festem und flüssigem Protoplasma, ebenso wie unter constanten Verhältnissen, auch in den genannten Versuchen fortdauert. Eine Änderung in diesem Processe trat aber, so weit sich beurtheilen liess, unter solchen Versuchsbedingungen nicht ein und gelegentlich erhielt sich trotz wiederholter Durchtreibung von Öl, Vacuolen oder festen Körpern die Begrenzung des Strömungsfadens selbst 3 Minuten lang in anscheinend unveränderter Gestalt.

1) Über Unterschied zwischen Stossreizen und Contactreizen vgl. Pfeffer, Unters. a. d. bot. Institut zu Tübingen 1885, Bd. I, p. 483.

2) Ebenso wirken von aussen anstossende feste oder flüssige Körper nicht in auffälliger Weise als Reiz auf ein Plasmodium. Vgl. die vorige Abhandlung p. 151.

Digitized by Google

Der Druck, welchen Öltropfen und Vacuolen im Streben zur Gleichgewichtsfigur, der Kugelform, ausüben, erreicht jedenfalls eine nennenswerthe Grösse, wenn wir ihn auch nicht ganz genau bemessen können. Denn ausser von dem Krümmungsradius wird der Centraldruck auch durch die Spannung an der Grenzfläche bestimmt und diese Spannung eben kennen wir nicht. Ja wir können nicht einmal sagen, ob diese Spannung allein als Oberflächenspannung an der Grenzfläche zweier Flüssigkeiten zu stande kommt, oder ob noch eine gewisse elastische Cohäsion der Vacuolenhaut mitspielt, die wenigstens um Vacuolen vorhanden ist[1]. Aber selbst bei geringer Spannung in der Oberfläche fällt doch mit kleinem Krümmungshalbmesser der Centraldruck (Capillardruck) erheblich aus, da dieser bekanntlich im umgekehrten Verhältniss zum Radius steht. Ist also z. B. eine Berührungsfläche des deformirten Öltropfens oder der deformirten Vacuole mit dem Protoplasma eine Cylinderfläche, so lastet nun auf letzterer die Hälfte des Centraldruckes, welcher von der freien kugelförmig gekrümmten Endfläche ausgeht. Dem gesellt sich aber bei geigenförmiger Gestaltung der Vacuolen oder Öltropfen der an der einwärts gedrängten Stelle negativ werdende Capillardruck hinzu. Doch mit den Krümmungsradien allein, die in einer für unsere Zwecke ausreichenden Genauigkeit ermittelt werden könnten, ist der Capillardruck nicht bestimmt, der aber auf Grund von Erwägungen über Oberflächenspannung gegen das begrenzende ruhende Protoplasma einen Druck von 80 bis 160 mgr pro Quadratmillimeter, vielleicht aber auch einen um das vielfache höheren Druck ausüben dürfte.

Um entsprechenden Widerstand leisten zu können, muss die Cohäsion des ruhenden Protoplasmas die des strömenden jedenfalls sehr erheblich übertreffen, denn in diesem zähflüssigen Medium wird von Öltropfen und Vacuolen augenblicklich die einer gleichmässigen Oberflächenspannung entsprechende Kugelgestalt angenommen. In der Erreichung und Erhaltung dieser ist zugleich angezeigt, dass weder in der begrenzenden Plasmaschicht, noch in dem übrigen strömungsfähigen, zähflüssigen Körnerplasma (abgesehen von der

1) Es mag deshalb erlaubt sein auch von Capillardruck zu reden, wenn auch vielleicht andere als reine Flüssigkeitsspannungen im Spiele sind, die übrigens mit Bezug auf unsere Frage gleichen Effect erzielen.

Digitized by Google

Stromkraft) merkliche Spannungs- und Druckdifferenzen gegenüber den Vacuolen und den Öltropfen zur Geltung kommen. Nach diesen Bemerkungen bedarf es keiner näheren Erörterungen, dass die Cohäsion des ruhenden Plasmas immerhin relativ ansehnlich sein muss, obgleich der den strömenden Faden begrenzende Cylinder einen nur geringen Krümmungsradius besitzt. Ohne einen erheblichen Cohäsionsunterschied würde das ruhende Körnerplasma dem besprochenen Drucke ausweichen, gleichviel ob es nach aussen von dem Hyaloplasma umgrenzt ist oder, in einer Plasmodiumfläche, anderseitig wiederum an eine Strömungsbahn stösst. Die Dicke der ruhenden Schicht hat natürlich für deren Widerstandsfähigkeit immer Bedeutung und wenn jene, bei Reduction auf eine dünne Hyaloplasmazone, dennoch den gekennzeichneten Druckwirkungen gewachsen ist, so wird allerdings auch in Betracht zu ziehen sein, dass das Hyaloplasma oder die Hautschicht wahrscheinlich eine relativ ansehnlichere Consistenz als das ruhende Körnerplasma besitzen.

Alle diese mechanischen Leistungen hängen durchaus von den Protoplasmaströmungen ab. Demgemäss übt überhaupt das zähflüssige Körnerplasma, für welches annähernd die hydrostatischen Gesetze gelten, einen entsprechenden Druck gegen die begrenzende Wandschicht und jedenfalls kommt dieser Druck an den Stellen voll zur Geltung, gegen welche der Strom gerichtet ist. Finden an solcher Stelle Öltropfen und Vacuolen eine Widerlage, so werden sie entsprechend deformirt und wenn ein sich gabelnder Strom nach zwei Seiten Zugkräfte entwickelt, kann es selbst zu einem Zerreissen von Öltropfen oder Vacuolen kommen (vgl. p. 218 und Fig. 8). Leicht begreiflich ist aber auch, dass die in dem zähflüssigen Körnerplasma freischwebenden Vacuolen, während sie mit dem Strome fortgerissen werden, gewisse, doch gewöhnlich nur mässige Abweichungen von der Kugelform erfahren, zu der sie indess mit Nachlassen der Strömung sogleich zurückkehren. Die Thatsache, dass alle diese Deformationen nur in directer Abhängigkeit von der mechanischen Stromkraft zu stande kommen, und dass sie ebenso die todten Öltropfen treffen, schliessen die Mitwirkung einer durch Bewegung und Reibung ausgelösten Reizwirkung aus. Gleicherweise wird aber auch nicht etwa erst durch die Berührung mit Öltropfen u. s. w. die nöthige Cohäsion der ruhenden Plasmahülle gesteigert, da diese ohnedies

Digitized by Google

einen gleichen oder sogar höheren Druck von Seiten des Körnerplasmas auszuhalten hat.

Aus den mechanischen Wirkungen würde man natürlich auf die stromerhaltende Kraft schliessen können. Um aber über diesen wichtigen Punkt bestimmte Grenzwerthe zu erlangen, fehlt eine nähere Kenntniss des Capillardrucks resp. der Oberflächenspannung in Öltropfen und Vacuolen. Nach den schon erwähnten Erfahrungen mit diesen entspricht die stromerhaltende Kraft mindestens einem Druck von 80 bis 100 mgr auf das Quadratmillimeter, ist aber wohl sicher ansehnlicher. Zu einer Bestimmung der stromerhaltenden Kraft nach der von POISEUILLE für enge Capillaren gefundenen Formel fehlt die Kenntniss der inneren Reibung im strömenden Plasma, die natürlich annähernd unter Voraussetzung der Gültigkeit dieser Formel zu berechnen wäre, sobald man über die Stromkraft sicheren Aufschluss hätte. Letztere würde z. B. bei einer Stromschnelligkeit von 0,1 mm pro Secunde einer Länge von 10 mm und einem Durchmesser von 0,02 mm des Stromfadens, also bei Verhältnissen, wie sie in Plasmodiensträngen vorkommen, nur einen Druck von 9,3 mgr auf das Quadratmillimeter betragen, wenn die Constante für Wasser eingesetzt wird[1]). Zweifellos ist

---

1) Für Wasser in Capillarröhren berechnet sich die stromerzeugende Kraft (H) in mm Quecksilber nach der Formel

$$H = \frac{v \cdot l}{d^2 \cdot \text{const.}},$$

in der v die Stromgeschwindigkeit in mm pro Secunde, l die Länge und d den Durchmesser der Capillare bezeichnet (NÄGELI und SCHWENDENER, Mikroskop II. Aufl., p. 384). Für Wasser ergiebt sich daraus, indem für 15° C. die Constante 3636,3 gesetzt wird, der unter den angegebenen Bedingungen berechnete Werth von 0,687 mm Quecksilberdruck, entsprechend einem Wasserdruck von 9,34 mm oder 9,34 mgr auf das Quadratmillimeter. Wie bekannt, steigt aber mit der Zähflüssigkeit die innere Reibung und damit die Constante sehr erheblich und es mag in dieser Hinsicht auf die auf Seite 264, Anmerkung, angeführten Versuche mit Gelatine verwiesen sein. Bei der Sachlage hätte es keinen Zweck näher zu discutiren, in wie weit die Erfahrungen an geraden und starren Capillaren auf die Strömung in Plasmodien anwendbar sind (vgl. auch FICK, Medicin. Physik 1885, III. Aufl., p. 102). Auch sei daran erinnert, dass in dem allseitig abgeschlossenen Körnerplasma nur Druckdifferenzen stromerzeugend wirken und der auf dem bewegten Plasma lastende volle Druck also nicht in Bewegung umgesetzt wird. — Anschliessend mag hier darauf hingewiesen sein, dass eine allmähliche Wanderung

Digitized by Google

aber die innere Reibung im zähflüssigen Plasma sehr viel ansehnlicher und so kann man nicht wissen, ob die stromerhaltende Kraft im Plasmodium 10 oder 100 mal grösser ist.

Eine gewisse Einsicht in die Cohäsion ist auch durch directe Belastung freier Plasmodienstränge zu gewinnen. Diese vermochten in annähernden Bestimmungen mit Chondrioderma einen Zug von 30 bis 60 mgr pro Quadratmillimeter ohne merkliche Überschreitung der Elasticitätsgrenze auszuhalten, wenn die Spannung nur 1 bis 4 Minuten anhielt. Da das strömende zähflüssige Plasma offenbar nur wenig zu dieser Tragfähigkeit beiträgt, die ruhende Umhüllung aber nur $\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{5}$ der Querschnittsfläche betragen haben mag, dürfte für diese ein Tragvermögen von 120 bis 300 mgr anzunehmen sein. In diesem sind aber sicherlich die offenbar ungleich cohärenten Schichten des ruhenden Protoplasmas in verschiedenem Grade betheiligt.

Abgesehen von anderen Schwierigkeiten macht der Wechsel der Cohäsionsverhältnisse eine genaue Bestimmung dieser in dem Plasmodium unmöglich. Ein solcher Wechsel wird unmittelbar durch den wechselseitigen Übergang zwischen flüssigem und relativ festem Aggregatzustand und durch die damit verknüpfte Verdünnung und Verdickung der ruhenden Schichten angezeigt. Ebenso stehen damit die amöboiden Formänderungen in Verbindung, welche auch in einem Flächenstück nach längerer Bewahrung des Umrisses wieder Ausgestaltungen zu stande bringen können. Ein solcher Wechsel geschieht auch in den mit dem strömenden Plasma nicht in directer

---

des Protoplasmas von Zelle zu Zelle durch die freien Verbindungskanälchen, wenigstens mit Rücksicht auf die stromerzeugende Kraft, nicht gerade unmöglich erscheint, wie Noll annimmt (Naturwissenschaftl. Rundschau 1888, p. 59; Arbeit. d. botan. Instituts in Würzburg 1888, Bd. III, p. 531). Setzt man in obiger Formel $d = 0{,}001$ resp. $0{,}0001$ mm (diese geringe Grösse können sichtbare Objecte nicht erreichen), $l = 0{,}01$ mm, $v = 0{,}001$ mm, so berechnet sich für Wasser als Werth für H ein Druck von 0,00275 resp. 0,275 mm Quecksilber. Also selbst wenn die innere Reibung des Protoplasmas recht ansehnliche Werthe erreicht, könnte doch noch ein ausreichender langsamer Transport stattfinden, da hierfür nöthigenfalls ganz ansehnliche Bewegungskräfte in der Zelle zur Verfügung stehen. Ob solcher Austausch thatsächlich stattfindet, ist freilich eine andere Frage. Vgl. darüber auch Pfeffer, Unters. a. d. botan. Institut zu Tübingen Bd. II. p. 314.

Digitized by Google

Berührung stehenden Theilen, wie das locale Hervorwachsen von Pseudopodien in der Peripherie ruhender Plasmaschichten zeigt.

Bei solchem Wechsel muss aber, ähnlich wie in einem Cylinder aus Wachs oder Gelatine, der bald hier, bald dort durch Wärme erweicht wird, eine Verlängerung schon durch eine Zugkraft erzielt werden, der gegenüber das Plasmodium (resp. das Wachs) bei dauernder maximaler (statischer) Cohäsion vollkommene Elasticität bewahren würde. Da aber in dem immerhin doch weichen Plasmodium ein gesteigerter Zug an jeder beliebigen Stelle eine Verschiebung der Theile zu erzielen vermag, so ist, insbesondere bei minimaler und erst in längerer Zeit erreichter plastischer Dehnung, schwer zu sagen, was ohne und was mittelst Cohäsionsänderungen im Plasmodium erreicht wurde. Zudem tritt dabei noch die Frage auf, ob etwa der Zug als Reiz Wirkungen geltend macht und eine unbedingte Negation solcher Annahme ist nicht aus den Erfahrungen abzuleiten, dass feste und flüssige Körper auf das Plasmodium weder beim Anprall von aussen, noch im Innern eine auffällige Reizwirkung ausüben.

Jedenfalls ist verständlich, wie ein Plasmodiumstrang gegen eine Zugkraft sich zunächst wie ein elastischer Körper verhält, bei derselben Spannung aber nach 5 bis 15 Minuten eine bleibende Verlängerung erfährt, die schliesslich sogar, nach allmählicher Verdünnung einer Stelle, zum Abreissen führen kann. Ein derartiges Zerreissen wird der Regel nach bei allmählicher Steigerung der Spannung erreicht, während bei einem plötzlichen Anwachsen dieser auch Zerreissen ohne vorhergehende locale Einschnürung erfolgt.

Das Plasmodium ist aber, selbst bei maximaler Cohäsion, immer ein weicher Körper, dessen absolute Festigkeit 300 oder 1000 mgr pro Quadratmillimeter nicht übersteigen mag, während zum Zerreissen eines Bleidrahts von gleichem Querschnitt eine Belastung von 1,9 bis 2,2 Kilo nöthig ist. Die Cohäsion mag wohl annähernd durch eine mehr oder weniger erstarrte Gelatine versinnlicht werden, die auch eine weitere Veranschaulichung der im Plasmodium gebotenen Verhältnisse gestattet, wenn man dafür sorgt, dass ein Achsenfaden flüssiger Gelatine sich in einem erstarrten Mantel dieser Substanz bewegt[1]).

---

1) Zu diesem Zwecke benutzte ich 2proc. Gelatine, in welcher Carmin aufgeschwemmt war. Diese wurde auf gewünschter Temperatur in einem Gefäss

Digitized by Google

Die Dehnungsversuche wurden mit sehr kräftigen Plasmodien von Chondrioderma angestellt, welche von Fabastengeln frei in Wasser herabhingen und zunächst dem Stengelstück einen einfachen Strang bildeten, der weiterhin sich gewöhnlich verästelte. Indem nun der Stengel im dampfgesättigten Raume aus dem Wasser gehoben wurde, lastete auf besagtem Haftstrange der Zug des in Luft schwebenden Plasmodiums, dem zumeist noch kleine Fabastückchen anhafteten. Dieses spannende Gewicht wurde direct mit der Wage ermittelt und z. B. in einem Falle zu 3,5 mgr bestimmt, während der tragende Strang an den dünnen Stellen ungefähr 0,3 mm Durchmesser, also eine Querschnittsfläche von annähernd 0,07 mm besass. Demgemäss wirkte hier auf das Quadratmillimeter ein Zug von 50 mgr und dieser erzielte im Laufe von $2^1/_2$ Minuten keine merkliche Verlängerung, während nach 12 Minuten ein Ausziehen des tragenden Stranges begonnen hatte. Mit Übergehung anderer Versuche erwähne ich noch, dass in einem Falle in dem etwa 0,06 Quadratmillimeter Querschnittfläche besitzenden Plasmodiumstrang bei einer Belastung von 210 mgr pro Quadratmillimeter sogleich plastische Dehnung bemerklich und in ungefähr $1^1/_2$ Minute ein Abreissen in der vorhin beschriebenen Weise herbeigeführt wurde[1]). Zu gleichen Resultaten führten übrigens Controlversuche, in welchen die Plasmodien unter Wasser einer bekannten Spannung ausgesetzt waren. Von der anscheinend elastischen Dehnbarkeit kann man sich an den submersen Strängen durch directes Spannen mit der Hand überzeugen, wenn das

---

gehalten, in welches der eine Schenkel eines dünnen Glasrohres tauchte, dessen andere Seite mit einem Gefäss communicirte, in welchem die Luft durch die Pumpe verdünnt werden konnte. In der Mitte war das Glasrohr in eine Capillare ausgezogen, die an der Beobachtungsstelle ungefähr einen Durchmesser von 0,2 mm hatte. Durch Abkühlen der Capillare, nöthigenfalls unter Zuhülfenahme von einigen Eisstückchen oder Salpeterkrystallen, konnte dann leicht erreicht werden, dass in einer erstarrten Wandschicht ein Achsenfaden flüssiger Gelatine sich bewegte. Wurde die Temperatur der zuströmenden Gelatine erhöht, so nahm die Dicke der Wandschicht ab und wuchs in entgegengesetztem Falle durch Ansatz erstarrender Gelatine. Die ganze Erscheinung ähnelte im Wesen der Sache sehr der Strömungsbewegung in Plasmodien. Wie sehr aber die Zähflüssigkeit auf die Bewegung influirt, mag daraus erhellen, dass in einer 80 mm langen Capillare leichtflüssige Gelatine schon bei einem Luftdruck von 10 mm Quecksilber ungefähr so schnell wie der Strom in Plasmodien sich bewegte, während zur Erzielung solcher Schnelligkeit der Druck auf 400 — 500 mm gesteigert werden musste, als die Gelatine dem Erstarren sich näherte, obgleich immer noch die strömende Masse bis an die Glaswand reichte.

1) Natürlich kann auch durch einen genügend kräftigen Wasserstrom ein Zerreissen herbeigeführt werden, wie es Hofmeister (Pflanzenzelle 1867, p. 62) beobachtete.

Digitized by Google

Plasmodium beiderseitig an Stengelstückchen anhaftet und so Handhaben bietet. In allen diesen Versuchen spielt freilich die schleimige Hülle, sofern solche vorhanden, in etwas mit. Übrigens war diese in verschiedenen Versuchen an den in Betracht kommenden Stellen nicht ausgebildet.

Anschliessend sei hier auch der Cilien in Schwärmzellen gedacht, welche wohl eine noch ansehnlichere Cohäsion haben müssen, um durch ihre Thätigkeit die zur Fortbewegung des verhältnissmässig grossen Organismus nothwendige Arbeit leisten, resp. die damit verknüpften Spannungen aushalten zu können [1]). Letztere muss z. B. sehr ansehnlich werden, wenn Bodo saltans mit einer Geisel haftet und durch die kräftigen Schnellbewegungen der ganze aus Masse und Geschwindigkeit resultirende jedenfalls verhältnissmässig sehr ansehnliche Zug auf diese Geisel wirkt [2]). Ein derartiges Verhalten kommt wohl auch bei Chlamidomonas pulvisculus vor, wenn eine oder beide Wimpern mit der Spitze festhaften. Die Cilien dieses Organismus sind ausserdem durch Contact reizbar und schleudern durch ihre damit erzielte Ausstreckung den Organismus ganz plötzlich um ein erhebliches Stück im Wasser zurück [3]). Diese erhebliche Arbeitsleistung, resp. Spannung fällt aber den Cilien zu, deren Querschnittsfläche dabei ungefähr nur den 70sten Theil des Querschnitts des Schwärmers beträgt. Für Chlamidomonas ermittelte ich z. B. in einem Falle den grössten Querschnitt senkrecht zur Längsachse zu ungefähr 0,025 Quadratmillimeter, die Querschnittsfläche beider Cilien zusammen zu 0,00036 Quadratmillimeter und das Volumen des cilienfreien ellipsoidischen Körpers zu 0,000000250 Cubikmillimeter. Ferner deutet z. B. die Durchzwängung des Körpers der Samenfäden von Farnen auf ansehnliche Cohäsion und elastische Eigenschaften [4]). Dabei hat die Körpermasse, analog wie das erstarrte Plasma der Myxomyceten, die Fähigkeit, in der Eizelle in einen sich vertheilenden Zustand überzugehen und die Cilien entstehen ja aus Cytoplasma (Hautschicht), in das sie gelegentlich wieder aufgenommen werden [5]).

Zur näheren Berechnung des in Öltropfen bestehenden Centraldrucks fehlt die genügende Kenntniss der Spannung an der Oberfläche, welche in jedem Falle wie ein elastisches Häutchen wirksam ist. Wenn wir auch voraussetzen wollen, dass Olivenöl und ebenso das strömende Protoplasma nur als Flüssigkeiten in Betracht kommen, so lässt sich doch die an der Grenzfläche beider bestehende Oberflächenspannung nicht nach dem Verhalten von Olivenöl gegen Wasser oder Eiweisslösung ermitteln; wissen wir

---

1) Über Bewegungen kleiner Körper in Wasser vgl. Nägeli, Botanische Mittheilungen 1881, Bd. 3, p. 337.

2) Pfeffer, Unters. a. d. bot. Institut zu Tübingen 1888, Bd. II, p. 595.

3) Pfeffer, ebenda 1884, Bd. I, p. 446.

4) Pfeffer, l. c., 1884, p. 394.

5) Vgl. Klebs, Unters. a. d. botan. Institut zu Tübingen 1883, Bd. I, p. 256.

Digitized by Google

doch nicht einmal, ob gelöstes Eiweiss in der Contactfläche existirt (vgl. bezüglich der Plasmahaut p. 248). Diese Oberflächenspannung a_{12} (d. h. die in mgr gemessene Spannung, welche auf die Strecke einer Flüssigkeitsoberfläche von der Breite eines Millimeters ausgeübt wird) bestimmte Quincke[1] für frisches Olivenöl und Wasser zu 2,296 mgr, für Olivenöl und hoch concentrirte Eiweisslösung, wie sie in der Contactfläche im Protoplasma jedenfalls nicht besteht, zu 0,359 mgr. Mit 0,2 mgr für a_{12} dürften wir also sicher einen zu geringen Werth annehmen, mit dem sich nach der Formel $p = a_{12}\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'}\right)$[2] ein Capillardruck ($p$) von 80 mgr resp. von 160 mgr pro Quadratmillimeter berechnet, wenn der Radius der Öltropfen zu 0,005 resp. zu 0,0025 mm gesetzt wird.

Thatsächlich erleiden sogar Öltropfen von noch geringerem Durchmesser die früher beschriebenen Deformationen und nehmen dabei an den freien Endflächen Werthe für R an, welche unter den oben eingesetzten Grössen liegen. Dann lastet aber auf der cylindrischen Contactfläche des begrenzenden Protoplasmas (da $R' = \infty$ ist) der halbe obige Capillardruck. Diesem addirt sich ferner bei biscuitförmiger Einschnürung der nun negative Druck und da zudem a_{12} voraussichtlich grösser ist als 0,2 mgr, so üben solche kleine deformirte Öltropfen wohl sicher auch ansehnlichere, vielleicht weit ansehnlichere Druckwirkungen auf das ruhende Protoplasma aus.

Über den Capillardruck in Vacuolen sind ebenso keine sicheren Grössen zu ermitteln und es muss fraglich bleiben, ob dieser in den Vacuolen grösser oder kleiner ist als in Öltropfen. Da aber beide in dem Körnerplasma, sofern mechanische Deformationen ausgeschlossen sind[3], selbst bei ansehnlicherem Durchmesser sogleich die Kugelgestalt annehmen und bewahren, so ist damit zugleich angezeigt, dass jenes sich annähernd wie eine Flüssigkeit verhält und dass auch an der Contactfläche in keiner anderen Weise, wie z. B. durch chemische Differenzen, Spannungsunterschiede von einiger Bedeutung veranlasst werden. Denn mit solchen müsste die Kugel in eine andere Gleichgewichtsfigur übergehen, damit für jeden Punkt der Oberfläche die Summe der Hauptkrümmungsradien dieselbe wird[4].

Die hier benutzten Methoden erschöpfen natürlich nicht die Mittel, welche zur Erforschung der Cohäsionsverhältnisse angewandt werden können. Auch wird es ferneren Studien unzweifelhaft gelingen, die Oberflächenspannung

---

1) Quincke, Annal. d. Physik u. Chemie 1888, N. F., Bd. 35, p. 581. Vgl. z. B. auch Lehmann, Molekularphysik 1888, Bd. I, p. 254.

2) Quincke, l. c., p. 584; Lehmamn, l. c., p. 254.

3) Dahin gehört auch die Längsdehnung der Vacuole, welche z. B. durch einen eingeschlossenen zu langen Gypskrystall erzielt wird.

4) Vgl. auch Pfeffer, Osmotische Untersuchungen 1877, p. 171.

Digitized by Google

resp. den Capillardruck an Öltropfen, Vacuolen oder anderen Gebilden annähernd zu ermitteln und so bestimmtere Werthe für die Deformationskräfte, also auch für die stromerzeugende Kraft und die Widerstandsfähigkeit des umgebenden ruhenden Plasmas zu gewinnen. Vielleicht lässt sich innerhalb der Plasmodien eine von Quincke[1]) angewandte Methode nutzbar machen, nach der die Oberflächenspannung an einer Flüssigkeitsblase aus dem Abstand von Kuppe und Bauch dieser ermittelt wird. Ferner ist z. B. die Einführung weicher Körper von bekannter Cohäsion möglich und auch aus der Vergrösserung oder Verkleinerung der Vacuolen, bei gleichzeitiger Kenntniss der dabei wirksamen osmotischen Kräfte, lassen sich möglicherweise weitere Mittel entnehmen.

B. Über die Cohäsion des Protoplasmas in hautumkleideten Zellen.

Die an sich nur geringe Cohäsion der Plasmodien ist immerhin ansehnlicher, als die Cohäsion in denjenigen Protoplasten, welche innerhalb einer Zellhaut leben und in letzterer Widerlage und Stütze finden. Diese Protoplasten verhalten sich, als Ganzes betrachtet, allgemein wie eine mehr oder weniger zähflüssige Masse. Doch wie in physikalischer Hinsicht keine scharfe Grenze zwischen zähflüssigem und weichem Aggregatzustand gezogen werden kann (p. 255), sind auch die zähflüssigen und weichen Protoplasten durch Übergänge verknüpft. Ohne hier die specifischen und zeitweiligen Cohäsionsdifferenzen in Protoplasten zu discutiren, sei daran erinnert, dass in den Plasmodien nur das peripherische Plasma festweich ist, diese consistentere Schicht aber, namentlich in dünneren Strängen, auf einen dünnen Hyaloplasmasaum reducirt sein kann. Damit nimmt die Cohäsion des Ganzen ab und Stränge, die vorwiegend aus strömendem Protoplasma bestehen, verhalten sich bezüglich ihres Aggregatzustandes augenscheinlich ähnlich wie die in Zellhauthüllen lebenden Protoplaste. Durch etwas stärkeren Zug oder Druck können aber die Plasmodien ebenfalls jederzeit plastisch deformirt werden und bei dauernder gleichsinniger Wirkung erzielen selbst geringere Kräfte solche Deformationen, indem sie im Erfolge, wie schon erläutert wurde, durch den Wechsel in der Cohäsion unterstützt werden.

Auch spielt sich während der normalen Lebensthätigkeit eine

1) Poggendorff's Annalen 1870, Bd. 139, p. 5.

Verschiebung der Theilchen in den festeren Partien der Plasmodien ab und solche Fähigkeit ist nothwendig, um den Plasmodien amöboide Ausgestaltungen, Aufnahme fester Partikel u. s. w. zu gestatten. Solche Ausgestaltungen sind jedenfalls die Folge örtlicher Verschiedenheiten in den wirkenden Kräften und überhaupt der maassgebenden Bedingungen. Wenn aber diese localen Differenzen aufhören, die ganze Oberfläche sich nun also wie eine Haut annähernd gleicher Spannung verhält, so ist bei der gekennzeichneten und sich erhaltenden Verschiebbarkeit der Theile wohl verständlich, dass ein solches Plasmodium allmählich Gleichgewichtsfiguren zustrebt, wie sie zähflüssige Medien und speciell auch die in Zellhaut eingeschlossenen Protoplaste (z. B. bei Plasmolyse) schneller erreichen.

Abgesehen von gewissen Entwickelungsstadien[1]), wird ein solches Streben nach besagter Gleichgewichtsfigur anscheinend allgemein im Plasmodium bemerklich, sobald die normale Lebensthätigkeit mehr oder weniger beeinflusst wird. Wenigstens sind Abrundungen, Zerspaltungen u. s. w. z. B. bei Temperaturextremen, Sauerstoffentziehung, Chloroformiren, elektrischen und mechanischen Eingriffen[2]), gewöhnlich zu bemerken. Freilich kann man dabei nicht ohne weiteres wissen, in wie weit eine Abnahme der Cohäsion mitwirkt und, dem allgemeinen Eindruck nach, scheint in der That bei ungünstigen äusseren Einflüssen die Mächtigkeit der relativ starren Plasmahülle sich öfters zu verringern. Ähnliche Erfolge erzielen auch plasmolytische Einflüsse, in denen freilich (wie für alle Fälle zu beachten ist) im Verhältniss zu den Cohäsionskräften eines Plasmodiums sehr ansehnliche osmotische (negative) Druckkräfte entwickelt werden können.

Den zellhautumkleideten Protoplasten kommt, wie bereits durch Mohl, Nägeli, Pringsheim u. A. erkannt wurde, der Regel nach eine mehr oder weniger zähflüssige Beschaffenheit zu. Es folgt dieses schon aus dem schnellen Streben zur Gleichgewichtsfigur bei plasmolytischen Wirkungen und der faltenlosen Vergrösserung oder

1) Vgl. de Bary, Pilze 1884, p. 460.

2) Einige Beobachtungen dieser Art bei Kühne, Unters. über das Protoplasma 1864, p. 74 ff. Vgl. auch Pfeffer, Physiologie Bd. II, p. 383 und diese Abhandlung p. 198.

Digitized by Google

Verkleinerung der Oberfläche des lebenden Protoplasmas, das auch gegenüber sehr geringen osmotischen Drucken sich entsprechend verhält. Ebenso zerfallen langgestreckte Protoplasten, wie Flüssigkeitscylinder, in einzelne sich endlich separirende Abschnitte und bei localer Abhäsion an der Zellwand werden bei plasmolytischer Contraction dünne Plasmafäden ausgezogen und dem entsprechende Gleichgewichtsfiguren angenommen[1]). Diese Fäden aber entstammen der Hautschicht und lehren, dass letztere, wie nach den früheren Argumenten die Plasmahaut überhaupt, ihre Oberfläche wie eine zähflüssige Masse, nöthigenfalls unter Betheiligung des Cytoplasmas vergrössert oder verkleinert (vgl. p. 228, 234). Demgemäss ist mit einer relativ grösseren Dichte der Plasmahaut (p. 238) dennoch eine schnelle Verschiebung der aufbauenden Theile möglich und so auch wohl verständlich, dass die sich dauernd in Continuität erhaltende Vacuolenhaut in den Protoplasmaströmungen mitbewegt ist.

Im strömenden Protoplasma pflegt sich die Hautschicht in Ruhe zu befinden, auch wenn sie nicht mehr durch Adhäsion an die Zellwand gehemmt ist, und z. B. in Nitella und Chara wird die ruhende, die Chlorophyllkörner beherbergende[2]) Schicht etwas ansehnlicher, ist übrigens, ebenso wie die ruhende Schicht in Plasmodien, in veränderlicher Weise gegen das bewegte Cytoplasma abgegrenzt. Wohl möglich, dass die Dichte des letzteren in etwas von der ruhenden peripherischen Masse übertroffen wird, doch selbst wenn die Cohäsion der letzteren etwa den ruhenden Schichten in Plasmodien gleich stände, würden sie doch bei ihrer geringen Mächtigkeit dem Protoplasma keine erheblichere Cohäsion zu verleihen vermögen und auch ein Plasmodiumstrang verhält sich wie zähflüssig, wenn die nicht strömende Peripherie auf sehr geringe Dicke reducirt ist. Übrigens ist aus der relativen Ruhe allein noch nicht auf grössere Cohäsion zu schliessen (p. 256), welche demgemäss auch nicht an-

---

1) Vgl. Berthold, l. c. und die andere auf p. 253 genannte Literatur.

2) Vgl. z. B. Velten, Flora 1873, p. 97; Hofmeister, Pflanzenzelle 1867, p. 35, 45, 53, 78 und die dort citirte Literatur.

3) Die Chlorophyllkörner gerathen übrigens gelegentlich in die Strömung. Vgl. auch darüber Pringsheim, Jahrb. f. wiss. Botan. 1879/81, Bd. XII, p. 333.

Digitized by Google

sehnlicher in denjenigen Protoplasten sein muss, welchen auffällige Strömungsbewegung abgeht.

Durch Strömung wird allerdings der zähflüssige Zustand angezeigt und diesem entsprechend senken sich in bewegten, aber auch in ruhenden Protoplasten Fremdkörper vermöge ihres specifischen Gewichtes, doch hindert die Zähflüssigkeit Molekularbewegung kleiner Partikel. Bei Stauung von Stärkekörnern und Chlorophyllkörpern aber wird durch die Stromkraft die Vacuolenhaut gegen den Zellsaft ausgebaucht, vermag also dem durch die Stromkraft entwickelten Drucke keinen ausreichenden Widerstand entgegenzusetzen[1]).

Da in den zellhautumkleideten Protoplasten die Verhältnisse schon der geringen Mächtigkeit halber ungünstiger liegen, um aus der Deformation von Vacuolen u. s. w. bestimmtere Anhaltspunkte über den Cohäsionszustand zu erhalten, so habe ich nähere Beobachtungen in dieser Richtung nicht angestellt. Übrigens ist bekannt, dass sich, der zähflüssigen Beschaffenheit entsprechend, frei im Protoplasma befindliche Vacuolen ebenso wie in Plasmodien abrunden. Auch ist z. B. in den Wurzelhaaren von Trianea zu ersehen, dass die Stromkraft eine Vacuole zu deformiren vermag, wenn diese gegen die Hautschicht gepresst wird. Sobald aber die Vacuolen (zu denen natürlich auch der Zellsaft gehört) nur durch dünne Lamellen getrennt sind, werden Gleichgewichtsfiguren wie in zähflüssigen Medien, also z. B. Schaumgewebe oder Seilpolygone, angestrebt[2]). Demgemäss wird z. B. die Vacuolenhaut convex gegen den Zellsaft gewölbt, wenn jene eine dünne Trennungsschicht zwischen diesem und einer kleinen Vacuole bildet und Entsprechendes beobachtet man auch an Strömungsfäden, in denen eine Vacuole eingeklemmt ist. Übrigens wird auch im Plasmodium die Hautschicht nach aussen gewölbt, wenn sie nur als sehr dünne Lamelle eine kleine Vacuole von der umgebenden Flüssigkeit trennt.

---

1) Vgl. Pfeffer, Physiologie Bd. II, p. 380.

2) Vgl. Berthold, Protoplasmamechanik 1886, p. 166, 219. — Die realen Gestaltungen bedürfen übrigens doch mit Rücksicht auf die jeweiligen Ursachen näherer Studien, so auch schon der einfache Fall, dass ein langer cylindrischer Zellsaft mit gewölbten Endflächen durch ein Wandplasma von überall ungefähr gleicher Mächtigkeit umschlossen wird.

Digitized by Google

Speciell in dem Plasmodium liess sich in sehr evidenter Weise der wechselseitige Übergang zwischen zähflüssigem und festerem Cytoplasma verfolgen und voraussichtlich ist gewisser Cohäsionswechsel eine sehr allgemeine Erscheinung, die nicht auffällig hervortritt, wenn eine ansehnliche Schicht von relativ festem, nicht mitströmendem Cytoplasma fehlt[1]. Ob solche festere Cytoplasmahüllen in Primordialzellen sich häufiger einfinden, habe ich nicht untersucht. Übrigens sind z. B. die aus dem Cytoplasma entstehenden Cilien Beispiele für eine gesteigerte Cohäsion, welche natürlich, ebenso wie in Gelatine, nicht nothwendig mit Abnahme des Wassergehalts verknüpft sein muss.

Der gekennzeichnete Aggregatzustand und Cohäsionswechsel kommt, wie aus dem Gesagten genugsam hervorgeht, dem normal lebensthätigen Protoplasten zu. Demgemäss sind die daraus sich ergebenden Gestaltungen bei Plasmolyse u. s. w. nicht erst Folge einer durch Reizwirkung veranlassten Herabdrückung der Cohäsion, wie Velten[2] annahm. Damit ist natürlich nicht ausgeschlossen, dass, so gut wie in normalen Bedingungen, auch durch Reize ein Cohäsionswechsel sich einstellen kann und äussere Verhältnisse scheinen in der That in solchem Sinne auf Plasmodien influiren zu können.

Vermöge des Aggregatzustandes streben die Protoplaste in Zellhäuten im Allgemeinen in solchem Grade den zähflüssigen Medien zukommenden Gleichgewichtsfiguren zu, dass abweichende Gestaltung nur durch darauf zielende Constellationen sich erhalten. Die Plasmodien sind zwar auch genügenden Kraftleistungen gegenüber plastisch, doch ist es fraglich ob, trotz der früher gekennzeichneten Mitwirkung des Cohäsionswechsels, im Plasmodium der in der Peripherie entwickelte Centraldruck ausreichen würde, um diesem Protoplasma die einem zähflüssigen Medium entsprechende Gleichgewichtsfigur aufzudrängen. Jedenfalls würde solches nur sehr allmählich erzielt werden und schon dieserhalb vermag das sich

---

1) Wechsel in dem Aggregatzustand haben übrigens verschiedene Autoren angenommen, wie Pringsheim, Velten, Hanstein.

2) Die physiol. Beschaffenheit d. pflanzlichen Protoplasmas 1876, p. 5, 18. (Separatabz. aus Sitzungsber. d. Wiener Akad. 1876, Bd. 73.) — Auch Berthold (l. c., p. 86) erklärte sich schon gegen diese Auffassung Velten's.

Digitized by Google

ausgestaltende Plasmodium in bekannter Weise die mannigfachsten Umrisse anzunehmen, in denen naturgemäss, etwa wie in mässig starrer Gelatine, scharfe Ecken und Kanten fehlen, doch immerhin, z. B. in den Pseudopodien, sehr geringe Krümmungsradien erreicht werden.

C. Blicke auf Ausgestaltung und Strömung in Protoplasten.

Durch welche Ursachen und Mittel die Ausgestaltungen des Protoplasmas erreicht werden, ist keineswegs genugsam aufgehellt. Zur Klärung der Sachlage dürften indess einige Worte von Vortheil sein, wenn ich auch diese Frage nicht näher behandeln kann, welche in einiger Beziehung zu den Cohäsionsverhältnissen steht.

Mit Rücksicht auf die mechanische Ausführung kann allgemein gefragt werden, ob die gestaltenden Kräfte irgendwie oder irgendwo in dem Protoplasma entwickelt, oder ob jene durch die physikalische Oberflächenspannung geliefert werden. Nach dieser letzten Auffassung, welche Berthold und Quincke vertreten, würde allein die physikalische Spannung resp. deren Änderung an der Grenze zwischen dem Protoplasma und dem anstossenden Medium die bewegende Energie erzeugen. Eine locale Herabminderung der Oberflächenspannung würde also — um ein einfaches Beispiel zu wählen — eine Hervorwölbung des bezüglichen Flächenstückes erzielen, bis mit dem verminderten Krümmungsradius wiederum ein Gleichgewichtszustand bezüglich des Capillardrucks erreicht ist. Sollte solches zutreffen, so würde doch jedenfalls die Ursache der Spannungsänderungen in der Contactfläche des Protoplasmas, nicht in dem anstossenden Medium zu suchen sein. Denn abgesehen davon, dass die Ausgestaltungen im Allgemeinen mit Sistirung der Lebensthätigkeit mehr oder weniger erlöschen, fährt ein Plasmodium in Luft oder in Wasser in seiner amöboiden Thätigkeit fort, wenn auch beide Medien bei schnellem Wechsel offenbar in annähernd constanter Beschaffenheit an der Berührungsfläche erhalten werden. Gleiches ist aber sicher auch für die Cilien der Schwärmzellen der Fall, welche für sich in Bewegung sind und mit der ganzen Schwärmzelle ausserdem schnell den Ort wechseln. Auch im Zellsaft sorgt eine strömende Bewegung

Digitized by Google

durch Mischung offenbar für schnelle Ausgleichung aller localen Differenzen in der Zusammensetzung dieses Mediums.

Die Ausgestaltung der Plasmodien kann aber nicht durch solche Oberflächenspannung erklärt werden und für jene trifft zudem die Voraussetzung der genannten Autoren nicht zu, nach der auch diese Körper durchweg zähflüssig sein sollen. Bei der immerhin nennenswerthen Cohäsion dürfte aber kaum direct durch Oberflächenspannung eine genügende Energie entwickelt werden, um z. B. die kleinen Pseudopodien herauszumodeln, die auch aus völlig ruhendem Plasma (ohne jede Mitwirkung der Plasmaströmung) entstehen können, und die zugleich einen Beleg für eine ansehnliche Gestaltungskraft damit geben, dass sie gelegentlich Fremdkörper vor sich herschieben, welche ihr eigenes Volumen übertreffen.

Ausserdem aber sind in dem Übergang zwischen zähflüssigem und festerem Aggregatzustand innere Umgestaltungen gekennzeichnet, welche auch fern von der Oberfläche und also unabhängig von einer Oberflächenspannung sich abspielen. Sind aber solche Wechselzustände in der nicht strömenden Plasmaschicht Thatsache, so mögen wohl auch Imbibitionen oder andere Vorgänge in freilich noch nicht ermittelter Weise zu localer Hervortreibung von Pseudopodien führen können. Ferner ist wohl verständlich, wie in solchem Wechsel eine Steigerung oder Verminderung des von der ruhenden Hülle gegen das strömende Plasma geübten Centraldrucks ausgeübt werden kann und vielleicht findet in einem entsprechenden Antagonismus dieses Wechsels die abwechselnd hin und her wogende Plasmaströmung des Plasmodiums ihre Erklärung[1]).

Auf die Vorbringung anderer Gründe, die ebenfalls die Oberflächenspannung als bewegende Ursache in den Plasmodien unwahrscheinlich machen, darf ich hier verzichten, da dieselben ebenfalls nicht unbedingt beweisend sind. Auch ist ja die Cohäsion der Hautschicht des Plasmodiums nicht genügend bekannt, um genauer die zu den Gestaltungen nöthige Deformationsenergie berechnen zu können. Zudem könnte man schliesslich, freilich ohne Beweis,

---

1) Man kann denn auch wohl von Contractilität sprechen, wenn man sich bewusst bleibt, dass damit allein Dimensionsänderungen als eine complexe Grösse eingeführt werden. Vgl. z. B. Pfeffer, Osmotische Untersuchungen 1877, p. 192.

Digitized by Google

locale Oberflächenspannung von beliebig hohem Werthe zu Felde führen, da der von der Qualität der Hautschicht abhängige Factor nicht bestimmbar ist. Und weil von diesem Factor die Variationen abhängen müssen, sind auch Versuche nicht entscheidend, aus denen hervorgeht, dass selbst ansehnliche locale Differenzen in der Zusammensetzung der angrenzenden Lösung keinen besonderen Einfluss auf die besagten Gestaltungsvorgänge des Plasmodiums ausüben, die sich ferner in ähnlicher Weise ebenso in Wasser, wie in Luft abspielen.

Weiter ist hier z. B. der Cilien an Schwärmzellen zu gedenken, die, wie schon gezeigt wurde (p. 265), keine Flüssigkeit sein können, und ebenso wie die Pseudopodien der Myxomyceten sicher nicht durch verminderte Oberflächenspannung entstehen, aber trotz erheblicher Consistenz vermöge des Cohäsionswechsels wieder in das Cytoplasma eingezogen werden können. Die Ausgestaltungen an der schon recht festen Haut der Euglenen oder Infusorien wird aber wohl Niemand als mechanische Producte der Oberflächenspannung zu erklären versuchen.

In dem Streben nach der zähflüssigen Medien zukommenden Gleichgewichtsfigur, wie es die von Zellhaut umhüllten Protoplasten besitzen, ist die Oberflächenspannung jedenfalls wesentlich betheiligt. So ist umgekehrt möglich, dass in diesen Protoplasten locale Spannungsdifferenzen entsprechende Gestaltungen hervorrufen; wie weit dieses aber in Wirklichkeit zutrifft ist empirisch zu ermitteln und kann nicht durch ein einfaches Raisonnement erledigt werden, wie es bisher allein versucht wurde. Denn jede beliebige mechanische Leistung kann in Antagonismus mit den Spannungsbestrebungen entsprechende Deformationen erzielen und öfters wird dieses, wie evident in dem schon angeführten Falle von Vallisneria (p. 270), durch die Bewegungskräfte erreicht, deren Ursprung zunächst noch unbekannt ist[1]).

Bisher ist nicht einmal die in methodischer Hinsicht leichter zugängliche Frage in Angriff genommen worden, ob die Oberflächenspannung in der Grenzfläche des Protoplasten mit der Qualität des anstossenden Mediums erheblich verändert wird. Da ich in dieser Hinsicht nur beiläufige Erfahrungen

1) Auf die Gestaltungen im lebendigen Protoplasten habe ich hier nicht weiter einzugehen. Vgl. z. B. Hanstein, Botanische Abhandl. 1880, Bd. IV, Heft 2, p. 5; Berthold, Protoplasmamechanik 1886, p. 105.

Digitized by Google

besitze, begnüge ich mich auf einige dieser hinzuweisen, welche gegen eine sehr ansehnliche Variation der Oberflächenspannung unter den besagten Bedingungen sprechen. In schwach plasmolysirten Haaren von Heracleum sibiricum, deren Cuticula schwer permeabel ist, war es nach Kappung des Haares möglich, durch die Öffnung Ammoncarbonatlösung zunächst gegen die abschliessende Kuppe des Protoplasmas wirken zu lassen oder auch an diese Kuppe einen Gypskrystall anzuschwemmen, der bei dauerndem Wechsel des Aussenmediums sich allmählich löste. In beiden Fällen wurde aber die Oberflächenspannung jedenfalls nicht wesentlich modificirt, da sich Krümmung und Gestalt der Kuppe nicht merklich änderte. Vermöge der schwierigen Durchlässigkeit der Cuticula dringen ferner Ammoncarbonat, Wasserstoffsuperoxyd u. s. w. in den durchschnittenen Staubfadenhaaren von Tradescantia zunächst oder sogar fast allein einseitig, von der freigelegten Querwand aus, in die Zelle [1]). So kommen die anstossende Hautschicht, und bei Diosmose das angrenzende Protoplasma einschliesslich der Vacuolenhaut, zunächst und bis zur Erreichung des Gleichgewichts vorwiegend mit dem eindringenden Stoffe in Berührung. Dennoch war in der Gestaltung des Protoplasmakörpers gegen den Zellsaft hin nichts zu bemerken, was auf eine dieserhalb veränderte Oberflächenspannung bei Anwendung der beiden oben genannten Körper deutete. Dasselbe Resultat wurde erhalten, als zuvor die Bewegung durch Chloroformwasser sistirt worden war, der Protoplast also bis zu einem gewissen Grade einen stationären Zustand angenommen hatte. Die Erhaltung dieses stationären Zustandes, oder richtiger das ausgesprochene Streben nach der zähflüssigen Medien zukommenden Gleichgewichtsfigur, spricht auch nicht gerade für eine durch den Stoffwechsel der Protoplasten veranlasste Oberflächenspannung als Ursache von besonderen Gestaltungen. Denn während des Chloroformirens dauert die Athmung [2]) ungeschwächt fort und mit Entziehung des Sauerstoffs ist der Stoffwechsel in der intramolekularen Athmung [3]) in neue Bahnen gelenkt. Auch für Plasmodien wurden ähnliche Erfahrungen gewonnen, auf deren Ausführung ich hier verzichten darf.

Sachgemäss habe ich nur die Ausgestaltungen mit Rücksicht auf die aufzuwendende Energie behandelt und diese wird natürlich nicht durch die Oberflächenspannung geleistet, wenn letztere nur als auslösende Ursache wirksam sein sollte. Eine solche Reizwirkung ist bei entsprechender Sensibilität des

1) Vgl. Pfeffer, Osmotische Untersuchungen 1877, p. 140 Anmerkung; Zur Kenntniss d. Oxydationsvorgänge 1889, p. 391.

2) Elfving, Einwirkung von Äther und Chloroform auf Pflanzen 1886, p. 2. Öfversigt of Finska Vetensk. (Separ. aus Soc. Förh. Bd. XXVIII.) Theilweise wurde durch diese Anästhetica eine gewisse Erhöhung der Athmung erweckt.

3) Pfeffer, Physiologie Bd. I, p. 360; Palladin, Berichte d. botan. Gesellschaft 1887, p. 102; 1888, p. 270, 296.

Digitized by Google

Organismus selbst durch minimale mechanische Leistung möglich, doch ist freilich bis dahin noch keine Reizung durch Oberflächenspannung sicher gestellt. Ob speciell in chemotactischen und chemotropischen Bewegungen eine solche auslösende Ursache zu Grunde liegt, ist mindestens unwahrscheinlich, da keineswegs allgemein ein Erfolg da eintritt, wo eine Differenz der Oberflächenspannung zu erwarten ist[1]. Berthold[2], welcher die mechanische Ausführung der Gestaltung auf Oberflächenspannungen schiebt, ist darin nicht consequent, dass er gelegentlich wieder von der Oberflächenspannung als Reiz spricht[3] und damit eigentlich eine andere Energiequelle als Betriebskraft fordert. Übrigens hat Berthold[4] als Bewegungsursachen der schwingenden Wimpern auch Imbibitionsverhältnisse angenommen.

Quincke[5], der ebenfalls, aber nur auf Grund rein physikalischer Erfahrungen, für die Ausgestaltung von Amöben und anderen Protoplasten die Oberflächenspannung als mechanische Ursache fordert, hat seine Vorstellungen speciell an die Annahme einer den Protoplasten umkleidenden Ölhaut gekettet, die thatsächlich nicht vorhanden ist (p. 246).

Die Ausgestaltungen der Protoplasten stehen auch in Verbindung mit den Orts- und Strömungsbewegungen, bezüglich derer hier ebenfalls nur einige Bemerkungen mit Rücksicht auf die Oberflächenspannung gemacht werden sollen.

Da die Ortsveränderungen der Plasmodien von den amöboiden Gestaltungen abhängen, so sind auch jene aus den schon besprochenen Gründen sicher nicht durch die physikalische Oberflächenspannung zwischen Hautschicht und umgebendem Medium direct erzielt, wie Berthold und Quincke ebenfalls annehmen. In Verband mit diesen Bewegungen spielt sich im Plasmodium die bekannte hin und her gehende Protoplasmaströmung ab, welche anscheinend durch den antagonistischen Wechsel von Zunahme und Abnahme des Druckes resp. der Widerstände abhängt, welche das relativ feste Protoplasma auf das umschlossene zähflüssige Protoplasma ausübt[6], wenn auch noch nicht sicher erwiesen ist, ob dieses letztere nur passiv bewegt wird[7].

---

1) Vgl. Berthold, Protoplasmamechanik 1886, p. 129. — Pfeffer, Unters. a. d. bot. Institut in Tübingen 1888, Bd. II, p. 653.

2) L. c., p. 85 ff.

3) Z. B. l. c., p. 96, 129.

4) L. c., p. 107.

5) Annal. d. Physik u. Chemie 1888, N. F. Bd. 35, p. 639. Auch p. 627 ff.

6) Vgl. z. B. de Bary, Mycetozoen 1864, II. Aufl., p. 48; Stahl, Bot. Zeitung 1884, p. 187. Die chemotropischen Bewegungen sind offenbar nur als Reizerfolge aufzufassen. Intensivere Wirkungen von Kaliumcarbonat berechtigen ebenso wie locale Verletzungen zu keinen Schlüssen bezüglich der physikalischen Oberflächenspannung.

7) Berthold (l. c., p. 113) hat schon darauf hingewiesen, dass sich bei Amöben das Aussenmedium in Ruhe befindet und die Innenbewegung deshalb

Digitized by Google

Die Protoplasmaströmungen in hautumkleideten Zellen sind noch nicht causal aufgehellt und kritische zielbewusste Untersuchungen wurden in dieser Hinsicht noch nicht durchgeführt. Da aber das Zustandekommen dieser Bewegungen, ohne mit Thatsachen in Widerspruch zu treten, eine mechanisch verschiedene Erklärung zulässt, so muss dahin gestellt bleiben, welche oder ob überhaupt eine der bisher ausgesprochenen Hypothesen (die übrigens sich noch vermehren liessen) der Wahrheit entspricht. So ist naturgemäss auch nicht zu beurtheilen, ob und in wie weit etwa eine causale Übereinstimmung mit der Strömung im Plasmodium besteht, ob also etwa eine periodisch wiederkehrende und entsprechend fortschreitende Druckwirkung (z. B. von der Vacuolenhaut direct oder indirect ausgehend) die nächste mechanische Ursache der Protoplasmaströmungen abgibt.

Bei dieser Sachlage berühre ich diese Frage hier nur, um hervorzuheben, dass ebenso die versuchte Erklärung der Plasmaströmung aus Oberflächenspannung nur eine Hypothese ist, die bisher auch nicht durch annehmbare Gründe wahrscheinlicher als irgend eine andere Hypothese gemacht wurde. Doch ist es als ein Verdienst Berthold's anzuerkennen, auf die Oberflächenspannung und die damit verknüpften Ausbreitungserscheinungen als Vorgänge hingewiesen zu haben, durch welche thatsächlich in mechanischer Hinsicht Protoplasmaströmung erreichbar erscheint. Der Hauptsache nach sieht Berthold [1]) in ununterbrochen thätigem Stoffwechsel die Ursache, um an der Grenze zwischen Protoplasma und Zellsaft Spannungsdifferenzen und mit diesen die bewegende Kraft zu erzeugen. Die Erzielung dieser durch Oberflächenspannung und Ausbreitungserscheinungen ist auch bei Quincke vorausgesetzt, der aber den Schauplatz in die Hautschicht ver-

---

nicht auf gleicher Mechanik wie in einem Emulsionstropfen beruhen könne. Bei den Plasmodien nehmen, wie dargethan wurde, sogar recht ansehnliche peripherische Plasmalagen nicht an der Strömung theil. — Vgl. dagegen Bütschli, Über die Structur d. Protoplasmas, Verhandl. d. naturh.-med. Vereins zu Heidelberg 1889, p. 10 d. Separatabzugs. — Beiläufig sei hier auf Versuche hingewiesen, in denen ich Plasmodien bei 29—30 ° C. in 5- oder 10procentige Gelatine einbettete. Mit dem Erstarren der Gelatine war dann die amöboide Ausgestaltung auf ein Minimum eingeengt und damit war auch die hin- und hergehende Plasmaströmung ansehnlich oder ganz reducirt. Analog war das Resultat, als ich in solcher Weise ein Plasmodium von Chondrioderma einbettete, das zu einem in sich geschlossenen Ring erzogen worden war. Wie vor der Einbettung bestand die Plasmaströmung in einer hin- und hergehenden stark reducirten Strömung, es kam also unter diesen Umständen nicht zu einer dauernd gleichförmig gerichteten Rotationsströmung. Leider beginnen die in Gelatine eingebetteten Plasmodien, auch wenn für genügende Sauerstoffzufuhr gesorgt ist, bald in einzelne Theile zu zerfallen.

1) Protoplasmamechanik 1886, p. 116.

Digitized by Google

legt und den Vorgang an einen bestimmten Process kettet[1]). Dem Wesen nach soll in der Ölhaut, welche Quincke als peripherische Umkleidung des Protoplasten voraussetzt, unter Zutritt von Sauerstoff eine Vereinigung von Eiweiss und Öl entstehen und durch Ausbreitung dieser wieder zerlegbaren Eiweisssseife die Protoplasmaströmung erzielt werden.

Während die Auffassung Berthold's mit bekannten Thatsachen vereinbar ist, gilt dieses nicht für die specielle Ansicht Quincke's. Schon mit Rücksicht auf die Ruhe der Hautschicht, nöthigenfalls auch noch des angrenzenden Plasmas (p. 269) kann die bewegende Ursache nicht wohl in die Aussenfläche des Protoplasten verlegt werden[2]). Auch ist schon erwähnt (p. 275), dass durch Chloroform, bei voller Fortdauer der Athmungsthätigkeit und bei Bewahrung der zähflüssigen Beschaffenheit des Protoplasmas, in diesem die Strömung zum Stillstand kommt. Ebenso sistirt sehr verdünntes Ammoniak ohne Schädigung des Organismus die Protoplasmaströmung. Andererseits ist diese nicht durch Unterhaltung inhomogener Lösung um das Protoplasma hervorzurufen, wie schon bezüglich chloroformirter Objecte mitgetheilt wurde. Auch konnte in dem normal nicht bewegten Protoplasma der Haare von Coleus und der Wurzelhaare von Azolla durch locale Differenzen in der umgebenden Flüssigkeit Strömung nicht erzielt werden, ebensowenig in ausgetretenen Protoplasmamassen von Vaucheria, die in Zuckerlösung einseitig mit Eiweisslösung oder auch mit Öltröpfchen in Berührung gebracht wurden. Ferner sei daran erinnert, dass z. B. das normal ruhende Protoplasma in den Blättern von Elodea canadensis durch Verletzungen des Blattes oder auch nur benachbarter Stengeltheile in Bewegung gesetzt wird[3]), obgleich in Athmungsthätigkeit und anderen Bedingungen keine Änderungen vor sich gingen.

Die Plasmaströmung ist also kein so ganz einfaches physikalisches Phänomen, sondern ein Vorgang, der in noch unerkannter Weise mit gewissen

---

1) Annal. d. Physik u. Chemie 1888, N. F., Bd. 35, p. 627 ff.

2) Vgl. dazu auch Nägeli und Schwendener, Mikroskop II. Aufl. 1877, p. 393. — Ich bemerke dazu, dass während der Strömung, abgesehen von Kohlensäure, irgend ein Stoff nicht aus dem Protoplasma ausgegeben werden muss.

3) Vgl. Pfeffer, Physiologie Bd. II, p. 392. Thatsächlich kommt in vielen Fällen die Plasmaströmung erst als Folge von Verletzungen (auch noch durch andere Ursachen) zu stande. Die Strömung hat in intacten Wurzeln, Stengeln u. s. w. nicht die Verbreitung, welche de Vries annahm, der nach den Beobachtungen an Schnitten urtheilte. Demgemäss bildet diese Strömung überhaupt nur ein durchaus nicht allgemeines Hülfsmittel in der Stoffwanderung (vgl. hierüber Unters. a. d. botan. Institut zu Tübingen Bd. II, p. 314). — Thatsachen bringt die inzwischen erschienene Dissertation von Ida A. Keller (Über Protoplasmaströmung, Zürich 1890), in welcher freilich aus den Beobachtungen nicht zu billigende Schlüsse gezogen sind.

Digitized by Google

Thätigkeiten des Organismus verkettet ist[1]). Übrigens hat Quincke seine Meinung, ohne annehmbare Gründe aus den Erfahrungen am Organismus abzuleiten, nur auf seine physikalischen Erfahrungen gebaut und auf diese hin auch ungerechtfertigter Weise eine peripherische Ölschicht für den Protoplasten gefordert (p. 246). So gut aber, wie durch Oberflächenspannung kann auch durch elektrische Kräfte Bewegung erzielt werden und so könnte man auf Grund physikalischer Erfahrungen mit gleichem Rechte elektrische Wirkungen als Ursache der Plasmaströmungen fordern[2]). Die wahre Ursache wird aber nur aus dem Studium des lebenden Objectes selbst herauszulesen sein und mit Rücksicht auf die auch in Betracht zu ziehenden Bewegungen durch Oberflächenspannungen muss die Physiologie dem Physiker Quincke dafür dankbar sein, dass er wesentlich zur Aufhellung dieser physikalischen Phänomene beitrug.

VI. Allgemeine Bedingungen für Aufnahme und Speicherung von Körpern.

Zu den wesentlichen Functionen der Plasmahaut gehört die Regelung des Stoffaustausches. Damit im Zusammenhang steht dann ferner die Zurückhaltung und räumliche Trennung von Stoffen in dem Protoplasma und der Vacuolenflüssigkeit, sowie die Gesammtheit der Erscheinungen und Erfolge, welche durch diese wichtigen Verhältnisse ermöglicht und erzielt werden[3]). Ein allseitiges Eingehen auf diese Verhältnisse ist indess hier nicht beabsichtigt und in Folgendem sollen Diosmose, Stoffanhäufung und osmotische Leistung auch nur in soweit berührt werden, als es sich um die allgemeinen Fundamente dieser Processe handelt. Die Erfahrung, dass ein klares Verständniss der Fundamente öfters vermisst wird, veranlasst mich zu dieser Zusammenfassung, die wesentlich auf früheren Publicationen basirt, jedoch auch einige Erweiterungen zu geben vermag.

Bezüglich der Aufnahme und Anhäufung der Stoffe gelten auch

---

1) Des Zellkerns bedarf es indess für die Strömung nicht. Diese dauert auch in den plasmolytisch gänzlich separirten kernlosen Protoplasmamassen (z. B. in den Haaren von Heracleum sibiricum und Trianea bogotensis) noch längere Zeit fort.

2) Vgl. z. B. Velten, Flora 1873, p. 122; Nägeli und Schwendener, Mikroskop II. Aufl., p. 395.

3) Vgl. u. a. auch Pfeffer, Zur Kenntniss d. Oxydationsvorgänge 1889, p. 83.

Digitized by Google

heute die früher entwickelten allgemeinen Grundzüge[1]), welche durch meine Versuche mit Anilinfarben[2]) insbesondere eine bessere empirische Begründung erfuhren. Auf diese letztgenannte, sowie die früheren Arbeiten muss also ein für allemal verwiesen werden.

Das Verhältniss des Protoplasten zur Zellhaut, die hier immer in einer für Wasser leicht permeablen Qualität angenommen wird, können wir als bekannt voraussetzen. Auch genügt es daran zu erinnern, dass ein Körper, um von aussen bis in die Vacuolenflüssigkeit zu gelangen, resp. in umgekehrter Richtung sich zu bewegen, Hautschicht und Vacuolenhaut zu durchwandern hat. Dass diese von Wasser imbibirten Plasmahäute diosmotisch massgebend sind und innerhalb des Protoplasmas ein eintretender Körper sich verbreitet, wurde schon in dieser Abhandlung (p. 238) dargelegt. Ebenso ist gezeigt, wie neben gelösten und ungelösten (festen oder flüssigen) Stoffen auch Vacuolen von dem Protoplasma aufgenommen oder ausgestossen werden können[3]).

Wie in jedem Falle hat die exacte Forschung nach Erkenntniss der statischen, d. h. rein physikalisch-chemischen Eigenschaften der Plasmahaut zu trachten, um aus diesen und den in der vitalen Thätigkeit hinzutretenden Factoren die im Leben erzielten Thätigkeiten und Leistungen causal aufhellen zu können. Es ist eben die Plasmahaut, wie ich wiederholt in früheren Publicationen nachdrücklichst betonte, ein selbst lebendes Organ, das im Dienste des lebendigen Organismus und in Wechselwirkung mit diesem, sei es durch Änderung der eigenen Qualität, sei es durch anderweitige Einflüsse und Combinationen, Leistungen zu vollbringen vermag, zu welchen der statische Zustand allein nicht befähigt. Die Berechtigung solches zielbewussten Strebens wird aber damit natürlich nicht beeinträchtigt, dass die Erkennung der rein statischen Eigenschaften besondere Schwierigkeiten bietet und man selbst bezüglich der isolirten, plastischen Plasmahaut[4]) nicht sicher weiss, ob nicht, wie z. B. auch am

1) Pfeffer, Physiologie I, p. 43—66; Osmotische Untersuchungen 1877, p. 154 ff. Bezüglich der Gase vgl. Physiol. I, p. 85.

2) Pfeffer, Unters. a. d. bot. Institut zu Tübingen 1886, Bd. II, p. 299 ff.

3) Vgl. z. B. vorige Abhandlung p. 181.

4) Wir haben auch hier immer nur die plastisch bildsame, nicht die durch Erstarren molekular verwandelte Plasmahaut im Auge. Vgl. p. 239.

Digitized by Google

ausgeschnittenen Muskel, vitale Einzelfunctionen die Separation überdauerten.

In der wasserdurchtränkten Plasmahaut müssen, ebenso gut wie z. B. in einer künstlichen Niederschlagsmembran, die intermicellaren Räume einen geringen Durchmesser haben, da vielfach Molekeln von relativ geringer Grösse keinen Durchtritt finden. Letzterer hängt indess durchaus nicht allein von der Molekulargrösse ab, da bei Ansehnlichkeit dieser, wie z. B. bei manchen Anilinfarben, doch diosmotische Aufnahme möglich ist. Dieses rein physikalische Resultat ist wohl verständlich, da das Eindringen in eine Haut auch von der wechselseitigen Anziehung zwischen der Substanz dieser und dem gelösten Körper abhängt. Es gilt das übrigens ebenso für eine Ölschicht, welche zwei Wassermassen trennt und natürlich nur den im Öl löslichen Stoffen Diosmose gestattet. Auch lehrt die Durchpressung fester Partikel, dass selbst Körper von relativ ansehnlicher Grösse die Plasmahaut passiren können, ohne dass damit für gelöste Stoffe ein Weg geöffnet wird, denn die Plasmahaut schliesst hinter einem solchen Körper etwa ebenso zusammen, wie es eine Ölschicht oder eine Kautschuklamelle thut, durch welche man eine Nadel führt. Zu solchem Durchpressen ist natürlich eine äussere Arbeitsleistung nothwendig, während bei diosmotischem Durchwandern einer Haut und ebenso einer Ölschicht die bewegende Energie aus wechselseitiger molekularer Anziehung entstammt. Die trennende Haut verhält sich also gegenüber verschiedenen gelösten Stoffen gleichsam wie ein Sieb ungleicher Maschenweite. Doch ist die gegenseitige Anziehung der die Haut aufbauenden Partikel, sowie die damit zusammenhängende Grösse der intermicellaren Räume, ein in den diosmotischen Vorgängen wesentlich mitspielender Factor. Immer aber hängen Eindringen in die Haut und ebenso osmotische Leistungen von Molekularkräften ab, deren Bereich sich nur auf minimale Entfernungen erstreckt und directe Fernewirkungen des inneren Protoplasmas können also z. B. für diosmotische Aufnahme von aussen nicht entscheidend sein.

Eine völlige causale Aufhellung der diosmotischen Thatsachen ist indess selbst in rein physikalischer Hinsicht zur Zeit nicht wohl möglich. Es ist dieses schon dadurch bedingt, dass die Plasmahaut, deren Entstehung sogar von dem anstossenden Medium abhängig ist,

Digitized by Google

mit der Qualität der wässerigen Lösungen ihre Eigenschaften in gewissen Grenzen ändern dürfte (vgl. p. 248). Ferner ist u. a. nicht abzusehen, ob und in wie weit in den diosmotischen Vorgängen besondere Verhältnisse eine Rolle mitspielen. Ich erinnere z. B. an die Dissociation gelöster Stoffe und an Zertrümmerungen und Umsetzungen, die sich möglicherweise als Folge von Wechselwirkungen an und in der Plasmahaut (oder einer anderen trennenden Haut) abspielen könnten.

In dem lebensthätigen Organismus gestalten sich die Verhältnisse unendlich complicirter, da neue und uncontrolirbare Momente hinzutreten. So dürfte z. B. die Plasmahaut resp. der ganze Protoplast, abgesehen von specifischen Eigenheiten, mit zeitlicher Entwicklung oder mit der jeweiligen Thätigkeit in seinen Eigenschaften sich ändern und in dieser Hinsicht kann natürlich ein von dem Aussenmedium (das jetzt nicht allein in rein physikalischem Sinne ins Auge zu fassen ist) ausgehender Reiz unter Umständen mitspielen. Ferner ist ein Körper innerhalb des Protoplasmas besonderen Einflüssen ausgesetzt und solche mögen wohl gelegentlich z. B. durch Secrete, oder durch Bewegungszustände in den Vacuolen oder in dem Aussenmedium in einer für die Diosmose entscheidenden Weise in Betracht kommen. Dann ist weiter in den Bewegungszuständen und in der Energie des lebendigen Protoplasten überhaupt eine Arbeitskraft geboten, die in verschiedener Weise in den Stoffaustausch eingreifen kann.

Diese allgemeinen Andeutungen sollen nachdrücklich daran erinnern, dass die Erfolge lebendiger Organismen den verschiedensten nicht durchsichtigen Combinationen entspringen können und man sich hüten muss, ohne allseitige Abwägung für einen bestimmten Vorgang eine einzelne gerade zur Verfügung stehende Erklärung zu fordern. In der vollen Aufhellung dieser mannigfachen Vorgänge des Stoffaustausches der lebendigen Zelle bietet sich ein sehr ausgedehntes Arbeitsfeld, auf dem sicher nur stufenweise und allmählich die wirkliche Lösung erreicht werden wird. Auf einige Fälle, in denen (abgesehen von auffälligen Stoffmetamorphosen) durch die Lebensthätigkeit besondere Leistungen, eventuell in selbstregulatorischer Weise vollbracht werden, habe ich bei früherer Gelegenheit[1])

1) Namentlich in Unters. a. d. bot. Institut zu Tübingen Bd. II, p. 305.

Digitized by Google

hingewiesen. Dabei wurde auch hervorgehoben, dass bestimmte andere Stoffe jederzeit ihren Weg in die Zelle finden und diese keineswegs die allgemeine Fähigkeit hat, unnöthige oder schädliche Stoffe während der lebendigen Thätigkeit von der Aufnahme auszuschliessen.

Früher deutete ich auch allgemein an, dass durch die Bewegungen im lebenden Protoplasten aufnehmende oder ausgebende Thätigkeiten entwickelt werden können, doch hat augenscheinlich dieser Punkt wenig Verständniss gefunden und so dürften einige erklärende Bemerkungen am Platze sein.

Eine Beförderung durch die Bewegungsthätigkeit wird in der Aufnahme oder Ausgabe ungelöster fester oder flüssiger Partikel direct vor Augen geführt. Ferner werden mit Ausstossung des Vacuoleninhalts die in diesem gelösten Stoffe in den Zellsaft oder in die Aussenflüssigkeit gelangen[1]. Letzteres ist freilich bisher nur für die Plasmodien, nicht aber für die Protoplaste in Zellhäuten direct beobachtet worden. Mit der Neubildung der Vacuolen mögen auch wohl solche Stoffe in diese eingeschlossen werden und so transportfähig sein, welche durch die Plasmahaut nicht diosmiren. Ferner werden vom Zellsaft kleine Vacuolen abgeschnitten und sofern diese nach aussen entleert würden, könnte ein Transport aus der Zelle auf diesem Wege erreicht werden. Für Plasmodien hörten wir ausserdem, dass gelegentlich die Aussenflüssigkeit umwallt und als Vacuole in das Protoplasma geführt wird (p. 196).

Vermöge des Austausches der den Protoplasten aufbauenden Micellen oder Micellcomplexe zwischen Plasmahaut und umschlossenem Cytoplasma (p. 234) könnte auch auf verschiedene Weise ein Transport gelöster nicht diosmirender Stoffe erreicht werden, z. B. indem ein solcher Körper durch physikalische oder chemische Bindung an die Micellen gekettet und mit diesen von der Peripherie in das Innere oder umgekehrt befördert wird. In beiden Fällen kommt das wandernde Cytoplasmatheilchen in neue Bedingungen und mit diesen ist wiederum die Lösung der bezeichneten Verkettung denkbar. Insofern es sich hierbei um gelöste Stoffe handelt, kann man immerhin noch von Diosmose sprechen, wenn auch die Bewegungsthätigkeit

1) Vgl. die vorige Abhandlung p. 169.

Digitized by Google

der Plasmamicellen Bedingung für den Durchgang ist. Doch ist leicht einzusehen, wie bei solchem Modus die Grenze zwischen Diosmose und Aufnahme ungelöster Partikel unsicher wird.

Ob und in wie weit und in welchen besonderen Formen und Combinationen die im Princip angedeuteten Modalitäten in concreten Fällen wirklich eine Rolle spielen, das muss, wie gesagt, dahin gestellt bleiben. Diese Fragen sind auch nicht einmal für den Austausch ungelöster Theile und den Austausch durch Vacuolen zureichend ermittelt worden [1]).

In richtiger Erwägung der besagten Verhältnisse ist leicht einzusehen, dass auch eine einseitige Beförderung eines Stoffes möglich ist, ohne dass merkliche chemische Metamorphosen die entgegengesetzte Bewegung desselben hindern müssen. Dieses ist selbstverständlich, sobald Aufnahme oder Ausgabe durch die Bewegungsenergie des Protoplasmas besorgt wird, doch muss ein solches Resultat auch in anderer Weise erreichbar erscheinen. Denn die Aufnahme wird eventuell nur durch die besonderen Wechselwirkungen an der Plasmahaut erreicht, die selbst, wie auch der Complex der aus dem anstossenden Medium entspringenden Factoren, an der dem Protoplasma zugewandten Seite andere Bedingungen bietet, als an der nach den Vacuolen oder nach dem Aussenmedium gekehrten Fläche. Bei entsprechender Constellation könnte also z. B. ein Körper bis in das Protoplasma oder auch bis in den Zellsaft gelangen, ohne dass er umgekehrt zu wandern vermöchte [2]).

Die statischen wie die veränderlichen Eigenschaften müssen aber in der lebenden Zelle für Hautschicht und Vacuolenhaut nicht übereinstimmend ausfallen, und so ist denkbar, dass die beiden Plasmahäute bezüglich der diosmotischen oder der mechanischen Beförderung

---

1) Möglicherweise spielen die pulsirenden und andere sich nach aussen entleerende Vacuolen in dem Plasmodium eine Rolle im Stoffaustausch. Solche Vermuthungen sind übrigens für andere Organismen, sei es mit Bezug auf die Ernährung im Allgemeinen oder mit alleiniger Berücksichtigung der Athmung schon mehrfach ausgesprochen worden.

2) Die Möglichkeit einer einseitigen Durchlässigkeit wurde schon von Nägeli (Pflanzenphysiol. Untersuchungen 1855, p. 30) ins Auge gefasst. Doch ist deshalb nicht gerade nöthig, dass dieser Erfolg durch ventilartige Einrichtungen erreicht wird. Vgl. auch Pfeffer, Osmot. Unters. 1877, p. 160.

Digitized by Google

sich verschieden verhalten und z. B. eine einseitige Durchlässigkeit nicht beide zugleich betrifft. Möglich ist ferner, dass irgend eine Plasmahaut nur an begrenzten Flächenstücken besondere Eigenschaften oder Thätigkeiten entwickelt und vielleicht spielen solche Verhältnisse an bestimmten Contactflächen, wie z. B. in dem Stoffaustausch aneinanderstossender Zellen eine Rolle[1]). Nicht zu vergessen ist aber, dass bei noch so weitgehenden speciellen Eigenheiten anderen Stoffen der diosmotische Ein- und Austritt in gewöhnlicher physikalischer Weise offen stehen kann und für die Anilinfarben scheint dieses zuzutreffen.

Die Thatsache der Ernährung war immer ein Beweis für erfolgte Aufnahme verschiedener Stoffe, doch hat sich erst in jüngeren Jahren die Zahl der Körper vermehrt, deren Austausch direct verfolgt wurde[2]). Ich erinnere an die verschiedenen Anilinfarben[3]), ferner u. a. an Glycerin[4]), Kaliumnitrat[5]), Chlornatrium[6]), Harnstoff[7]), Wasserstoffsuperoxyd[8]). Für das Plasmodium wurde in dieser Abhandlung (p. 220) auch diosmotischer Austritt für Calciumsulfat und Asparagin nachgewiesen. Das Plasmodium scheint relativ leicht durchlässig zu sein, doch geht specifisch ungleiche Permeabilität auch aus den Erfahrungen an anderen Pflanzen hervor.

---

1) Vgl. auch Unters. a. d. botan. Institut zu Tübingen Bd. II, p. 313.

2) Vgl. in historischer Hinsicht Pfeffer, Physiologie Bd. I, p. 45.

3) Pfeffer, Unters. a. d. bot. Institut zu Tübingen, l. c., p. 179. In historischer Hinsicht (vgl. l. c., p. 269) wurde mir erst vor kurzem bekannt, dass Cornu und Mer (Extrait du congrès international de botanique et d'horticulture 1878) die Aufnahme verschiedener Anilinfarben in lebende Zellen an der Färbung des Protoplasmas erkannten. Weitere Schlüsse bezüglich Stoffaufnahme u. s. w. haben indess diese Forscher aus diesen Thatsachen nicht gezogen und da sie in einem Referate der Arbeit (Compt. rendus 1878, Bd. 87, p. 303) nur das Aufsteigen der Farben in der Zellwand behandeln, haben sie augenscheinlich auf die beobachtete Aufnahme gewisser Farben in die lebenden Zellen keinen besonderen Werth gelegt. — Die Aufnahme in Infusorien erfolgt auch durch die Mundöffnung, erstreckt sich demgemäss auf alle beliebigen Farbstoffe und ist nicht unmittelbar uud unbedingt dasselbe, wie die Aufnahme löslicher Farbstoffe in den geschlossenen Protoplasten.

4) Klebs, Unters. a. d. bot. Institut zu Tübingen 1888, Bd. II, p. 540, de Vries, Bot. Zeitung 1888, p. 229.

5) Vgl. Wieler, Ber. d. bot. Gesellschaft 1887, Bd. V, p. 375.

6) Janse, Mededeelingen d. Kon. Akad. v. Wetenschappen Amsterdam 1888, p. 332.

7) de Vries, Botan. Zeitung 1889, p. 309.

8) Pfeffer, Zur Kenntniss d. Oxydationsvorgänge 1889.

Digitized by Google

Ein Eingehen auf die nackten Thatsachen ist hier nicht geboten. In causaler Hinsicht lehrten meine Versuche bezüglich der Aufnahme und Nichtaufnahme von Anilinfarben Unabhängigkeit von vitalen Functionen[1]). Auch scheinen nach Versuchen, die allerdings kleinere Differenzen nicht leicht erkennen lassen, die anderen in Untersuchung gezogenen Körper gegenüber dem ganzen Protoplasten und der isolirten Vacuolenhaut gleiches Resultat zu ergeben[2]). Soweit es sich in den Experimenten um Anwendung plasmolysirender Lösung handelt, ist bisher nicht verfolgt, ob etwa Aufnahme oder Nichtaufnahme als Function der Concentration geregelt wird[3]).

Dass für die ja mögliche einseitige Durchlässigkeit noch keine sicheren Belege vorliegen, wird aus dem Folgenden hervorgehen.

Sobald in irgend einer Weise die Bedingungen für Aufnahme eines Körpers geschaffen sind, wird dieser so lange eintreten, als die bedingenden Ursachen es ermöglichen[4]). Bei einem rein diosmotischen Vorgang, also sofern ein einseitiges Beförderungsmittel nicht im Spiele ist, hört der Eintritt natürlich auf, sobald mit Erreichung gleicher Concentration zu beiden Seiten der Membran der Gleichgewichtszustand eingetreten ist. Wird aber dieser irgendwie gestört, so muss nothwendig die diosmotische Einwanderung fortdauern, und sofern die entstehenden Verbindungen oder Producte nicht exosmotisch entfernt werden, ist eine Anhäufung in der Zelle die nothwendige Folge. Dagegen ist ohne irgend eine Metamorphose eine Anhäufung dann möglich, wenn in irgend einer Weise für nur einseitige Beförderung eines Stoffes gesorgt ist. Selbstverständlich gelten diese allgemeinen Grundzüge ebenso für die Entfernung eines gespeicherten Stoffes aus der Zelle oder für irgend einen anderen Platzwechsel.

---

1) Pfeffer, l. c., p. 282.

2) Vgl. die Untersuchungen von de Vries und von Janse. Nach Wieler (l. c., p. 380) scheinen Zellen im Gewebeverbande sich anders zu verhalten, als im isolirten Zustande.

3) Abgesehen von der Aufnahme kommt hier auch die Regulation des osmotischen Druckes durch Stoffwechsel in Betracht (vgl. Eschenhagen, Über Einfluss verschiedener Concentration auf das Wachsthum von Schimmelpilzen 1889). — In causaler Hinsicht unbekannt ist, warum sich Schnitte aus Bewegungsgelenken in Salpeterlösung anders als in Wassser verhalten (Hilburg, Unters. a. d. bot. Institut zu Tübingen 1881, Bd. I, p. 32). — Nach Klebs (ebenda Bd. II, p. 545) hat vielleicht Eisenweinstein Einfluss auf die Aufnahme von Zucker in Algen.

4) Vgl. Pfeffer, Physiologie Bd. I, p. 56; Unters. a. d. bot. Institut zu Tübingen Bd. II, p. 308.

Digitized by Google

Während nun bekanntermassen sehr oft Stoffumwandlungen mit der Anhäufung von Stoffen (ebenso mit der Auswanderung gespeicherter Körper) Hand in Hand gehen, wurde bisher eine Anhäufung auf andere Weise noch nicht sicher gestellt. Sobald übrigens ein Körper nach beiden Seiten diosmirt, ist eine Anhäufung überhaupt nur durch das Eingehen einer neuen Verbindung möglich. Die Entstehung einer solchen wurde auch für Anilinfarben allgemein als Ursache für die Speicherung, wie die Zerlegung als Bedingung für das Auswandern erkannt, und zwar auch dann, wenn der gespeicherte Farbstoff sich als Lösung im Zellsaft befand. In diesem Falle vermag aber direct weder der Augenschein noch irgend eine nur den Farbstoff charakterisirende Reaction die Existenz einer Verbindung zu erkennen, welche von der zur Aufnahme gebotenen Farbstoffverbindung verschieden ist. Ebenso ist aber die Sachlage, wenn z. B. die Reaction auf Glycose erhalten wird oder wenn mit Nachweis von Salpetersäure in der Zelle sogar darüber Zweifel bestehen, ob diese, wie in dem dargebotenen Salpeter, mit Kalium oder etwa mit Calcium vereint ist.

Aus diesen Gründen ist es sehr häufig schwierig oder auch unmöglich zu entscheiden, ob im gegebenen Falle die aufgespeicherten und die zur Aufnahme gebotenen Molekeln eines Körpers genau übereinstimmen. Zu der Speicherung genügt aber irgend eine leichte Umlagerung, die durch die üblichen Reactionen eines Stoffes gar nicht wahrnehmbar zu sein braucht[1]). Ja, falls z. B. die Diosmose etwa durch Dissociation eines Körpers erst eingeleitet wird, muss es schon zu einer Ansammlung führen, wenn in dem der anderen Seite der Scheidewand angrenzenden Medium diese Dissociation nicht eintreten kann. Bei den besonderen und uns unbekannten Verhältnissen in einer lebendigen Zelle fehlt uns eben eine allseitige Einsicht in die phy-

1) Einige Bemerkungen in dieser Hinsicht in Unters. a. d. botan. Institut zu Tübingen Bd. II, p. 309. Ebenda und in meiner Arbeit: Zur Kenntniss d. Oxydationsvorgänge 1889, p. 90, ist auch auf die Bedeutung der Massenwirkung und die Durchführung partieller Reactionen zur Totalität, sowie die damit zusammenhängende Selbstregulation hingewiesen. — Bei Kenntniss von Qualität und Quantität der in einer Zelle gelösten Stoffe dürften in den hier angezogenen Fragen Schlüsse aus der osmotischen Leistung zu gewinnen sein, da diese in Beziehung zu der Molekulargrösse im Lösungszustand steht.

Digitized by Google

sikalisch-chemischen Bedingungen und so kann man nicht schlechthin über diese und ihre Erfolge aburtheilen. Ganz abgesehen von den lebendigen Eigenheiten ist schon zu bedenken, dass die Oberfläche der Plasmahaut gegenüber dem Volumen der kleinen Zellen relativ sehr ansehnlich ist und dieses für alles das ins Gewicht fällt, was irgendwie von der Plasmahaut oder Grenzfläche abhängt[1]). Möglich dass dieserhalb oder auch aus anderen in der Kleinheit des Raumes liegenden Ursachen manche Dinge sich etwas anders in der Zelle gestalten, in welcher zudem meist ein höherer osmotischer Druck besteht. Übrigens ist es nicht Absicht, alle die möglichen Mittel zu besprechen, die direct oder indirect zu solchen Umsetzungen führen können, sondern es handelte sich hier nur darum, die molekulare Änderung als eine Ursache der Anhäufung oder des Auswanderns gespeicherter Stoffe anzudeuten.

So lange aber in einem gegebenen Falle eine molekulare Änderung als Ursache der Ansammlung nicht widerlegt ist, kann man ein Zustandekommen auf andere Weise nicht als nothwendig fordern. Die Möglichkeit einer Ansammlung ohne molekulare Änderungen lässt sich andrerseits ohne besondere Gründe nicht abweisen, denn zu solchem Ziele kann, gleichviel wie erreicht, jede einseitige Beförderung eines Stoffes durch die Plasmahaut führen (vgl. p. 284).

Diese Erwägungen gelten natürlich ebenso, wenn es sich um Speicherung eines salpetersauren Salzes, anscheinend von Salpeter handelt. Solche Anhäufung ist lange bekannt[2]) und von Janse[3]) wurde bei Darbietung von Salpeter constatirt, dass Nitrat eindringt, aber nicht exosmirt. Die Erklärung legt Janse einseitig in die Eigenschaft der Vacuolenhaut, Salpeter wohl hinein, aber nicht hinaus zu lassen, fordert also ohne berechtigten Grund einen bestimmten, freilich möglichen Modus da, wo Gleiches durch verschiedene Ursachen erreichbar ist. Andere Modalitäten, ja nicht einmal die Frage, ob in der Zelle die empirisch nachgewiesene Salpetersäure als Kaliumnitrat vorhanden ist, hat Janse überhaupt gar nicht in Erwägung ge-

---

1) Vgl. p. 249. — Versuche über Einfluss der Raumgrösse auf Reactionen wurden von Liebreich angestellt (Sitzungsb. d. Berlin. Akad. 1889, p. 169).

2) Vgl. Pfeffer, Physiologie Bd. I, p. 47; Frank, Berichte d. botan. Gesellschaft 1887, p. 472; Schimper, Bot. Zeitung 1888, p. 121.

3) Die Permeabilität d. Protoplasmas 1888, Separatabz. aus Verslagen en Mededeelingen der Koninklijke Akad. v. Wetenschappen Amsterdam III. R., Bd. IV. Ausführliches Referat im Botan. Centralblatt 1888, Bd. 34, p. 10.

Digitized by Google

zogen. Auch schweigt Janse von der gelegentlichen Exosmose des Nitrats, die durch verschiedene Erfahrungen wahrscheinlich wird, welche auf eine Wanderung des Nitrats deuten. Da aber diese Annahme Janse's nicht erwiesen ist, so kann man natürlich auch nicht behaupten, dass, abweichend von der Vacuolenhaut, die Hautschicht stets nach beiden Richtungen für Salpeter durchlässig ist. Mit einem Worte ist aber natürlich keine Erklärung gegeben und wenn man die Janse'schen Bezeichnungen »Extrameabilität« und »Intrameabilität« [1]) nur als Ausdruck für die beobachtete Thatsache nehmen will, so sind sie eben mit exosmotischer und endosmotischer Bewegung gleichbedeutend. Übrigens sei daran erinnert, dass in den bisher untersuchten Pflanzen die Vacuolenhaut Anilinfarben (nach meinen Beobachtungen), sowie Glycerin und Harnstoff (nach de Vries) gleicherweise Exosmose und Endosmose gestattet. Vielleicht hat bei Janse die supponirte Autonomie der Vacuolenhaut zu einer Erklärung veranlasst, die eine besondere Activität der Vacuolenhaut fordert. Eine solche wäre übrigens sehr wohl auch bei heterogener Entstehung möglich und, wie schon früher (p. 227) betont wurde, kann aus specifisch verschiedenem Inhalt, also ebenso aus verschiedener Speicherungsfähigkeit, mit Bezug auf die Genesis der Plasmahaut ein berechtigter Schluss nicht gezogen werden.

Ob die Speicherung des Nitrats nach gleichem Princip zu stande kommt, wie die Speicherung der Anilinfarben, weiss ich so wenig wie Janse, der die als Erfolg der Stoffumwandlung nachgewiesene Anhäufung des Methylenblaus (bei Janse steht irrigerweise Aethylenblau) mit der Bemerkung abfertigt, dass es fraglich sei, ob der normale Protoplast den Farbstoff hindurchlasse und dass übrigens die Aufnahme von Methylenblau und Salpeter nichts mit einander gemein haben [2]). Wenn Janse den strengen Nachweis, dass während der Aufnahme des Methylenblaus die Plasmaströmung fortdauert, und, sofern nur die Lösung genügend verdünnt ist, die aufnehmende Zelle normal weiter wächst [3]), nicht als genügenden Beweis für eine Aufnahme in den lebendigen Protoplasten ansehen will, dann wäre wohl eine Äusserung erwünscht gewesen, wie er lebendige und pathologische Vorgänge sich geschieden denkt. Ging aber in Janse's Versuchen die Aufnahme von Nitrat aus concentrirten Salpeterlösungen vor sich, so ist doch bekannt, dass Pflanzen auch aus verdünnten Lösungen Nitrat anzuhäufen vermögen. Aber selbst wenn dieses nicht zuträfe, würde die eigentliche Speicherungsursache davon nicht berührt, wenn auch die specielle Frage auftauchen müsste, ob die Aufnahme von Nitrat erst als Function der Concentration der Salpeterlösung eingeleitet wurde und dabei wäre dann allerdings zu beachten, dass concentrirtere Lösungen mit der Zeit den Organismus schädigen können.

1) Janse, l. c., p. 5.

2) Janse, l. c., p. 79.

3) Pfeffer, Unters. a. d. bot. Institut zu Tübingen Bd. II, p. 197, 210 u. s. w.

Digitized by Google

Zum Schluss dürften einige Worte über die Quelle der zur Stoffanhäufung führenden Energie am Platze sein[1]. Wenn die Speicherung von einer Stoffumwandlung abhängt, ist diese direct oder indirect allerdings von einer Action des Protoplasten erzielt; die zunächst den Körper in die Zelle treibende Energie aber entstammt den Molekularkräften, welche überhaupt zu Diffusion, Imbibition und damit zu Diosmose führen, welche selbstverständlich mit dauernder Störung des Gleichgewichts fortdauert. Durch diese Molekularkräfte ist ohne eine bestimmte Stoffumwandlung, wenigstens unter bestimmten hier nicht näher zu discutirenden Voraussetzungen, eine gewisse Stoffanhäufung auch dann möglich, wenn der statische Zustand der Plasmahaut einem Körper den Eintritt in die Zelle, aber keinen Austritt gestattet. Zu beachten ist hierbei, dass Wasser dauernd endosmotisch und exosmotisch wandern kann und demgemäss der osmotische Druck in der Zelle nur durch Zunahme osmotisch wirksamer Substanzen steigt. Die endosmotische Bewegung selbst wird aber nicht mehr durch die genannten Molekularkräfte allein vermittelt, sobald irgendwie erst durch bewegende Kräfte des Protoplasmas die Durchwanderung der Plasmahaut erreicht wird. Bei solchem Aufwand von Energie des Protoplasmas kann natürlich immer ein Stofftheilchen ohne jede Veränderung von einer verdünnteren zu einer concentrirteren Lösung befördert und so in dieser potentielle Energie angehäuft werden. Um derartiges durch Stoffumwandlung zu erreichen, ist selbstverständlich auch active Zellenthätigkeit nothwendig, die aber in diesem Falle in die diosmotische Bewegung selbst nicht unmittelbar eingreifen muss.

Bei der immerhin nur langsamen Diffusionsbewegung ist in jedem Falle und so auch für die Beschleunigung der diosmotischen Bewegung, wie ich schon vor Jahren hervorhob, mechanische Mischung im Zellsaft und ebenso im Protoplasma von sehr wesentlicher Bedeutung. Neben anderen dauernd irgendwie thätigen Ursachen wirkt auch in solchem Sinne die Protoplasmaströmung mit, die aber, abgesehen von Haaren, keineswegs so allgemein verbreitet und thätig ist, wie es de Vries annahm, der einseitig allein diese Bewegung als massgebend in den Vordergrund drängte[2].

VII. Das osmotische System in der Zelle.

Die höchste osmotische Leistung wird erreicht, wenn ein gelöster Körper nicht diosmirt und in diesem Falle erzielen schon verdünnte Lösungen krystalloider Stoffe, wie ich 1877 nachwies, sehr ansehnliche Druckkräfte. Wie immer das Zustandekommen dieser

1) Vgl. Pfeffer, Physiologie Bd. I, p. 57.

2) Vgl. diese Abhandlung p. 278, sowie Unters. a. d. bot. Institut zu Tübingen Bd. II, p. 314 und die dort citirte Literatur.

Digitized by Google

erklärt werden mag, jedenfalls kommen die nicht diosmirenden Molekeln nur mit der Grenzfläche der abschliessenden Haut in Berührung und nur an dieser und gegen diese kann die aus Molekularkräften entspringende osmotische Leistung entwickelt werden. Dieses gilt natürlich ebenso, wenn die Plasmahaut (oder irgend eine andere Haut) zwei gelöste Stoffe scheidet, welche also nicht mit einander in directe Berührung kommen, auch nicht auf messbare Entfernungen durch Molekularkräfte auf einander wirken können. Demgemäss hat weder die Dicke der wasserimbibirten Plasmahaut, noch deren Anlehnung an ein gequollenes und dem Wasser den Durchtritt gestattendes Medium einen Einfluss auf die osmotische Druckhöhe, welche ein nicht diosmirender Körper hervorbringt.

Da nun in der lebenden Zelle durch ineinander geschachtelte Plasmahäute eine osmotische Separirung von Lösungen erreicht ist, so wird jene schon durch obige unantastbare, rein physikalische Sätze, als ein osmotisches System gekennzeichnet, dessen Bedeutung ich seiner Zeit nachdrücklich hervorhob[1]). Da aber thatsächlich diese Verhältnisse und die sich daraus ergebenden Consequenzen in den einschlägigen Arbeiten nicht richtig gewürdigt oder auch verkannt zu werden pflegen, so dürfte eine gedrängte Zusammenfassung der fundamentalen Punkte wohl nicht ohne Nutzen sein. Zur Vereinfachung sei nur der Fall ins Auge gefasst, dass die gelösten Stoffe nicht durch die Plasmahaut diosmiren und die Zelle sich in reinem Wasser befindet, also auch in der Zellhaut keine gelösten Stoffe enthalten sind. Im übrigen ist ja bekannt, dass die Zellhaut als Widerlage für den Protoplasten dient, nicht aber die osmotischen Leistungen in diesem bestimmt.

In Folge der allseitigen Begrenzung des Protoplasmakörpers mit Plasmahaut haben die im Zellsaft gelösten Stoffe an der Contactfläche der abschliessenden Vacuolenhaut, dagegen hat eine von aussen zutretende Lösung an der Aussenfläche der Hautschicht ihre osmotische Wirkung zu realisiren[2]). Sofern aber im Cytoplasma gelöste Stoffe vorhanden

1) Osmotische Untersuchungen 1877, p. 154, 168; vgl. auch Pflanzenphysiologie Bd. I, p. 50.

2) Es genügt, hier eine Zelle mit einfachem protoplasmatischem Wandbelag anzunehmen, da bei weitergehender Ausgestaltung des Protoplasten im Princip gleiches gilt.

Digitized by Google

sind, müssen diese nothwendig in Berührung mit den abgrenzenden Flächen von Hautschicht und Vacuolenhaut entsprechende osmotische Wirkungen hervorrufen. In analogem Sinne kommt, unabhängig von Inhalt und Qualität der Haut, in und an jedem abgegrenzten Gebilde osmotische Leistung zu stande, also auch in den kleineren Vacuolen, mögen diese im Protoplasma oder im Zellsaft liegen. Bei der zähflüssig-plastischen Beschaffenheit von Plasmahaut und Protoplasma muss natürlich eine Differenz des osmotischen Druckes in bekannter Weise zu Volumveränderungen führen, und durch Wasserabgabe nimmt z. B. die Concentration und damit die osmotische Leistung in der Vacuolenflüssigkeit so lange zu, bis der Gleichgewichtszustand gegenüber einer plasmolysirenden Lösung erreicht ist. Ein solches Gleichgewicht wird selbstverständlich ebenso in dem Protoplasma hergestellt und erhalten, doch ist hier in Erwägung zu ziehen, in wie weit die nöthige Gegenwirkung durch osmotische Leistung der im Cytoplasma gelösten Stoffe oder durch die Quellungskräfte, d. h. durch die Imbibition in ungelösten Massen erzielt wird.

Bei Mangel gelöster Stoffe kommt nur die Quellungskraft in Betracht und aus dieser muss, das Fehlen gelöster Stoffe vorausgesetzt, in dem zwischen Zellhaut und Vacuolenhaut eingeklemmten Protoplasma die Gegenwirkung gegen den bekanntlich oft sehr ansehnlichen osmotischen Druck des Zellsaftes entspringen[1]). Unter solchem Druck muss das Protoplasma, gegenüber dem maximalen Quellungszustand, etwas wasserärmer sein, doch könnte schon eine nur geringe Wasserabgabe ausreichen, um bei einer ansehnlich gesteigerten äusseren Pressung wieder die Äquivalenz des Gegendruckes in dem Protoplasma herzustellen, da bekanntlich im Allgemeinen die Quellungskraft mit dem Wasserverlust schnell ansteigt[2]). Gegen die Zellhaut wirkt durch Vermittelung des angepressten Protoplasmas, gleichviel ob dieses eine mächtige oder minimale Wandschicht bildet, der volle osmotische Druck des Zellsaftes, sofern nur dieser im Protoplasma hydrostatisch

1) Vgl. Pfeffer, Osmot. Untersuchungen p. 217.

2) Vgl. Pfeffer, Physiologie Bd. I, p. 23; Reinke, Untersuchungen über die Quellung 1879, p. 51. — Bei Einwirkung von Salzlösungen auf vacuolenfreie Protoplasmakörper kommt natürlich ebenfalls eine der osmotischen Wirkung entsprechende Wasserentziehung zu Wege.

Digitized by Google

fortgepflanzt wird. Eine solche volle Übertragung wollen wir auch zunächst annehmen, wenn sie auch nicht in aller Strenge zutrifft.

Befinden sich im Protoplasma gelöste Stoffe, so müssen diese durch ihre osmotische Wirkung nothwendig einen äquivalenten Theil der osmotischen Wirkung des Zellsaftes äquilibriren, zugleich aber auch einen entsprechenden osmotischen Druck gegen die Hautschicht entwickeln. Demgemäss bleibt der gegen die Zellwand ausgeübte Druck durch Einführung gelöster Stoffe in das Protoplasma unverändert und dieses auch dann, wenn sich zwischen Hautschicht und Vacuolenhaut eine dem Zellsaft isosmotische[1]) Lösung befindet. Auf der Vacuolenhaut lastet dann beiderseitig gleicher osmotischer Druck und unter diesen Umständen kann die beliebige Ineinanderschachtelung geschlossener osmotischer Systeme den Druck gegen die Hautschicht resp. die Zellhaut nicht modificiren. Dieser Druck bleibt deshalb derselbe, wenn beliebig viele kleine Vacuolen in dem Zellsaft oder Protoplasma auftauchen oder wenn in eine Zelle aus künstlicher Niederschlagsmembran eine kleinere Zelle mit isosmotischem Inhalt eingeschachtelt wird.

Aus diesen Erwägungen folgt unmittelbar, dass der vom Protoplasten gegen die Zellwand ausgeübte Druck die osmotische Leistung des Zellsaftes nicht übertrifft. Wenigstens gilt dieses, so lange der Protoplasmakörper keine Spannungen wie ein fester Körper zu entwickeln vermag. Annähernd ist dieses bei der zähflüssigen Beschaffenheit des Protoplasmas erreicht, die mit der leichten Verschiebbarkeit der Theile elastische Spannungen nicht zu erzielen und zu erhalten gestattet. Vermöge dieses schon näher charakterisirten Aggregatzustandes folgt eben das Protoplasma allen Zug- und Druckspannungen und ermöglicht so durch entsprechende Form- und Volumänderungen den Ausgleich osmotischer und anderer Druckdifferenzen bei plasmolytischer Wirkung. Nach plasmolytischem Ausgleich ist somit wiederum Gleichgewicht zwischen dem auf beiden Seiten der Hautschicht und Vacuolenhaut lastenden Druck erreicht. Damit ist aber die plasmolysirende Flüssigkeit selbstverständlich isosmotisch mit dem Zellsaft, in dem ja nur osmotische Leistung Druck

1) Diese von Tamman benutzte Bezeichnung ist synonym mit isotonisch (de Vries).

Digitized by Google

erzielen kann, gleichviel ob in dem Protoplasma gelöste Stoffe fehlen oder vorhanden sind. In letzterem Falle wirkt natürlich der Zellsaft nicht mit dem der plasmolysirenden Lösung entsprechenden osmotischen Überdruck gegen die Vacuolenhaut, da ja dieser einseitige Überdruck um die osmotische Leistung der Lösung im Protoplasma vermindert wird, das seine übrige Gegenwirkung, sofern die in ihm gelösten Stoffe nicht mit Zellsaft und Aussenflüssigkeit isosmotisch sind, durch seine Quellungskraft erzielen muss.

In welchem Verhältniss in Wirklichkeit im Protoplasma Quellungsdruck[1]) (so sei der Kürze halber gesagt) und osmotischer Druck wirksam sind, ist nicht sicher zu bemessen. Wir können überhaupt nur mit Wahrscheinlichkeit die Existenz gelöster Stoffe im Protoplasma annehmen, ohne über Qualität und Quantität derselben Bestimmtes zu wissen. Da bekanntlich aber colloidale Körper, zu welchen auch die Proteïnstoffe zählen, eine geringe osmotische Wirkung erzielen, so könnten diese unter den in der Zelle bestehenden Druckverhältnissen in ansehnlicher Menge im Protoplasma gelöst vorhanden sein[2]).

Unter den in der Zelle gebotenen Verhältnissen ist es denkbar, dass das Protoplasma, wenn es auch nur durch seine Quellungskraft dem auf mehrere Atmosphären steigenden Druck Widerstand zu leisten hat, dennoch seinen hohen Wassergehalt und die hohe Beweglichkeit der Theile, wie sie ja besonders beim Strömen zum Ausdruck kommt, bewahren kann. Aus diesem Gesichtspunkte möchte ich also nach reiflicher Überlegung nicht mehr wie früher[3]) das Vorhandensein gelöster Stoffe im Protoplasma bestimmt fordern. Die Frage bezüglich der Existenz gelöster Stoffe im Protoplasma wurde auch schon bei früherer Gelegenheit berührt (p. 245), kann aber nur durch neue Untersuchungen erledigt werden. Derzeit steht auch kein Mittel zu Gebote, um unabhängig von der stofflichen Qualität Quellungsdruck und osmotische Leistung in dem Protoplasma getrennt zu bestimmen. Ohne näheres Eingehen auf diese Fragen sei hier nur kurz bemerkt, dass selbst sehr ansehnliche Mengen gelöster Stoffe ohne zur Vacuolenbildung zu führen vorhanden sein könnten, da diese nur von localen Imbibitionsdifferenzen abhängt (p. 221). Ja diese Vacuolenbildung und die fernere Ausdehnung derselben durch

1) Es bedarf wohl keiner weiteren Erörterungen, dass Quellungsdruck durch Wasseranziehung seitens ungelöster Theile vermittelt wird, während gelöste Molekeln osmotischen Druck erzielen. Zwischen beiden ist natürlich die Grenze nicht schärfer gezogen, als zwischen Lösung und Nichtlösung.

2) Vgl. Pfeffer, Osmotische Untersuchungen 1877, p. 176.

3) Ebenda p. 170.

osmotisch wirksamen Inhalt kann sogar für Existenz gelöster Stoffe im Plasma geltend gemacht werden. Gewisse Mengen gelöster Stoffe müssen bei diosmotischer Bewegung durch das Protoplasma in diesem nothwendig vorhanden sein und wahrscheinlich sind überhaupt gelöste und nicht exosmirende Stoffe ein integrirender Bestandtheil im Protoplasma. Specifische Differenzen in Qualität und Quantität der gelösten Stoffe sind natürlich möglich und so kann man nicht schlechthin allgemeine Schlüsse aus den Primordialzellen ableiten, in denen allerdings höhere osmotische Leistungen nicht vorhanden sein können, da durch diese die Cohäsion der Hautschicht und des Protoplasmas überwunden werden würde.

Der osmotischen Leistung des Zellsaftes steht der von Hautschicht[1]) und Vacuolenhaut ausgehende Centraldruck (Capillardruck) entgegen, dem sich eventuell ein aus der Cohäsion des übrigen Protoplasmas entspringender Druck im positiven oder negativen Sinne addiren kann. Demgemäss wirkt nicht die volle osmotische Leistung des Zellsaftes, sondern der nach Abzug der genannten Grössen bleibende Betrag spannend auf die Zellhaut. Der vom Krümmungsradius abhängende gesammte Centraldruck lässt sich zwar nicht genau berechnen, dürfte indess in nicht zu kleinen Zellen kaum $^1/_{10}$ bis $^1/_5$ Atmosphäre erreichen, so dass er gegenüber dem gewöhnlich einige Atmosphären betragenden osmotischen Druck solcher Zellen eine relativ geringe, wenn auch nicht immer eine ganz verschwindende Grösse ist. Mit abnehmendem Durchmesser steigt aber dieser Centraldruck und in sehr kleinen Vacuolen mag er wohl bis zu einer Atmosphäre anwachsen können. Deshalb ist zur Erhaltung der Vacuolen eine äquilibrirende osmotische Leistung des flüssigen Inhalts nothwendig, denn reines Wasser würde durch den mit der Verkleinerung immer mehr anwachsenden Druck unvermeidlich ausgepresst und so die Vacuole zum Verschwinden gebracht werden.

Nach der Plasmolyse muss natürlich die osmotische Leistung des Zellsaftes die der Aussenflüssigkeit um den Werth des besagten Centraldrucks übertreffen. Sind dieserhalb also plasmolysirende Lösung und Zellsaft nicht genau isosmotisch, so wird man sie doch in der Praxis als isosmotisch betrachten. Übrigens wird durch die osmotische Leistung der eben plasmolysirenden Lösung im Allgemeinen

1) Der Centraldruck der Hautschicht hat natürlich auch eine osmotische oder anderweitige Druckentwicklung im Protoplasma zu überwinden.

Digitized by Google

der thatsächlich von dem Protoplasmakörper gegen eine Widerlage ausgeübte Druck angezeigt und leicht ist einzusehen, dass für vergleichende plasmolytische Untersuchungen die Existenz dieses Centraldrucks keine Bedeutung hat. Selbst wenn unter solchen Eingriffen die bestimmenden Factoren (Oberflächenspannung, Cohäsion u. s. w.) etwas variiren sollten, so dürften doch wohl die damit erzielten Variationen sich gewöhnlich in Grenzen halten, welche für solche Untersuchungen praktisch nicht in Betracht kommen. Dasselbe gilt hinsichtlich der geringen Modification der Krümmungsradien, welche mit der geringen Volumabnahme des Protoplasmas und der Vacuolenflüssigkeit herbeigeführt wird.

Unsere Schlüsse setzen immer ein Protoplasma voraus, das sich in seiner Cohäsion einer Flüssigkeit annähert, wie es thatsächlich für hautumkleidete Zellen zutrifft. Würde aber an Stelle dieses Protoplasmas ein genügend fester und gestaltungsfähiger Körper treten, so könnte dieser z. B. den osmotischen Druck der Vacuolenflüssigkeit allein tragen, also eine Spannung der Zellwand auf diesem Wege verhindern oder auch, etwa wie ein nach Vergrösserung strebender Kugelmantel, den Druck gegen die Zellwand steigern. Aber selbst das verhältnissmässig sehr consistente ruhende Plasma der Plasmodien ist derart plastisch, dass es in besagter Weise, gegenüber den osmotischen Spannungen, nur geringe Leistungen zu vollbringen vermöchte. Denken wir uns übrigens ein solches Plasmodium in eine zu enge Zellhaut so eingesperrt, dass es dieser allseitig anliegt, und lassen nun die üblichen Bestrebungen nach Ausgestaltung fortdauern, so müssen damit diesen Gestaltungsenergien entsprechende locale Differenzen der Druckwirkung gegen die Zellwand zu stande kommen (vgl. p. 272).

Zur Erzielung solcher Druckwirkung sind natürlich Vacuolen oder gelöste Stoffe im Protoplasma nicht unbedingt nothwendig, da auch eine angestrebte Quellung drückend gegen die Wand wirken kann. Übrigens ist der Quellungszustand des Protoplasmas innerhalb der Zelle immer durch die osmotischen Leistungen des Zellsaftes, resp. der plasmolysirenden Flüssigkeit regulirt. Erwägt man, dass die osmotische Leistung, wenigstens für verdünntere Lösung, proportional der Concentration steigt, die Quellungskraft aber mit Abnahme des Wassers schneller zunimmt, so ist ersichtlich, dass

Digitized by Google

eine genügend genaue Controle der Volumänderung im Protoplasma und Zellsaft (sofern eine solche möglich ist) wohl Anhaltspunkte für mancherlei Schlussfolgerungen geben könnte, wie z. B. auch in der Frage, ob im Protoplasma Quellungsdruck oder osmotischer Druck eine Rolle spielt. Allgemein habe ich übrigens schon in den Osmotischen Untersuchungen (p. 180—188) entwickelt, wie eine Controle der Volumveränderungen in Protoplasma, Zellsaft und kleineren Vacuolen vielleicht in mehrfacher Hinsicht nutzbar gemacht werden kann, z. B. um den Ort einer Reaction näher zu bestimmen[1]).

Da für Dehnung der Zellhaut und alle daraus resultirende Verhältnisse der vom Zellinhalt ausgeübte Druck, unabhänging von dessen Ursprung in Betracht kommt, so ist zweckentsprechend unter »Turgor« diese Gesammtspannung zu verstehen[2]). Wenn thatsächlich Sachs[3]) u. A. mehr oder weniger bestimmt Turgorkraft und osmotischen Druck identificirten, so geschah dieses wohl nur in Rücksicht darauf, dass letztere gewöhnlich so gut wie allein entscheidend ist, doch wäre, wie angedeutet wurde, auch in vacuolenfreien Protoplasten ein sehr ansehnlicher Turgor recht wohl möglich. Ich würde auch diese physikalisch und physiologisch so selbstverständliche Sache nicht berühren, wenn nicht bei Went[4]) unbegreiflicherweise ausgesprochen wäre, dass erst mit Entdeckung der Vacuolen in jüngsten Zellen die in diesen bestehende Wandspannung verständlich geworden sei. Went übersieht also neben der Quellungswirkung des Protoplasmas die mögliche Existenz gelöster Stoffe in diesem, welche in Contact mit der Hautschicht osmotisch wirken müssen.

Dass aus der Cohäsion des zähflüssigen Protoplasmas (abgesehen von der Oberflächenspannung) kein ansehnlicher Centraldruck entspringen kann,

1) Ein specieller Fall ist auch die Plasmolyse, welche Nägeli (1855) ihrem Wesen nach und auch mit Bezug auf Volumabnahme des Ganzen und des Zellsafts richtig erkannte. Mit alleiniger Bezugnahme auf den Zellsaft hat de Vries (Jahrb. f. wiss. Botanik Bd. XVI, p. 567, 579) die unter bestimmten einfachen Verhältnissen erfolgenden Volumänderungen besprochen. — Die entwickelten Grundzüge sind übrigens auch leicht dem Falle anzupassen, dass ein Stoff exosmirt oder endosmirt.

2) So aufgefasst bei Pfeffer, Physiologie Bd. II, p. 240; Bd. I, p. 50. — Das Wort Turgescenz wurde bereits von Dutrochet (Mémoires d. végétaux et d. animaux, Brüssel 1837, p. 18) für osmotische Spannung benutzt.

3) Vgl. z. B. Lehrbuch d. Botanik 1874, IV. Aufl., p. 757; Vorlesungen über Pflanzenphysiologie II. Aufl., 1887, p. 577. — Die bekannte Entstehung von Steifheit durch osmotische Spannung wurde in botanischer Hinsicht z. B. hervorgehoben durch Brücke (Müller's Archiv f. Anatomie und Physiologie 1848, p. 434; Nägeli, Pflanzenphysiol. Untersuchungen 1855, I, p. 25 und Mikroskop 1867, I. Aufl., p. 377.

4) Jahrb. f. wiss. Botanik 1888, Bd. 19, p. 350.

Digitized by Google

ergibt sich daraus, dass selbst das relativ feste, nicht mitströmende Plasma der Plasmodien nur zur Entwickelung eines geringen radialen Druckes unter den in den Zellen gebotenen Verhältnissen befähigt ist. Nehmen wir nach den früheren Dehnungsversuchen am Plasmodium als die ohne plastische Verschiebung der Theile zulässige elastische Spannung (t) den wohl zu hohen Werth von 300 mgr pro Quadratmillimeter an (vgl. p. 262) und lassen ein solches Protoplasma in einer kugeligen Zelle von 0,01 mm Radius (r) einen 0,005 mm dicken Wandbelag (d) bilden, so berechnet sich nach der Formel[1] $p = \frac{2 . d . t}{r}$ ein radialer Druck von 0,3 gr pro Quadratmillimeter = 0,03 Atmosphären.

Für die Bestimmung des von Hautschicht und Vacuolenhaut ausgehenden Centraldrucks fehlt, wie schon früher (p. 114) bemerkt wurde, die genügende Kenntniss der Tangentialspannung. Setzen wir $a_{12} = 1,0$ mgr, r hinwiederum = 0,01 mm und zwar in gleicher Weise für Hautschicht und Vacuolenhaut, so berechnet sich für den gleichsinnigen Centraldruck beider ein Druck von 400 mgr pro Quadratmillimeter = 0,04 Atmosphären. Sollte aber auch a_{12} den vierfachen Werth erreichen, so würde doch immer nur ein Radialdruck von 0,16 Atmosphären erzielt und dieses kann nach dem Obigen durch die Cohäsion des zwischen den beiden Plasmahäuten befindlichen zähflüssigen Cytoplasmas nicht wesentlich verstärkt werden.

Ist aber in einer Vacuole $r = 0,002$ mm, so wird für $a_{12} = 1,0$ mgr der von der Vacuolenhaut erzielte Capillardruck = 2,0 gr pro Quadratmillimeter = 0,2 Atmosphären, kann also für die an der Grenze der Sichtbarkeit liegenden Vacuolen recht wohl auf 1 Atmosphäre steigen, ohne dass a_{12} einen höheren Werth annehmen muss.

Kleine Vacuolen können also immerhin einen gewissen osmotisch wirkenden Inhalt führen, ohne einen Druck nach aussen geltend zu machen. Es ist dieses für Primordialzellen von Bedeutung, welche gewöhnlich nur kleine Vacuolen führen und die in dem umgebenden Plasma gelöste Stoffe von ansehnlicher osmotischer Wirkung nicht enthalten können (p. 295). Wohl möglich aber, dass diese Vacuolen durch ihr Verhalten, nöthigenfalls auch nach dem Isoliren aus dem Protoplasma in den hier angedeuteten Fragen verschiedene Aufschlüsse bringen können.

Beiläufig sei hier daran erinnert, dass die durch Asparagin oder Gyps in einem Plasmodium erzeugten Vacuolen auch dann eine begrenzte Grösse erreichen, wenn sie frei im strömenden Plasma liegen und sich in ihnen ungelöste Substanz findet (p. 200). Würde damit die Lösung gesättigt erhalten, so müsste bei solchem constanten osmotischen Druck die Vergrösserung um so mehr fortschreiten, als mit zunehmendem Radius der Centraldruck abnimmt. Vielleicht erklärt sich besagtes Verhalten schon durch die ziemlich ansehnliche Exosmose von Asparagin und Gyps, doch könnten auch noch andere Momente mitspielen.

1) Nägeli und Schwendener, Mikroskop 1877, II. Aufl., p. 414.

Digitized by Google

VIII. Der osmotische Druck in der Zelle.

Neben der Aufdeckung des auch im vorigen Kapitel wiederum besprochenen osmotischen Systems verfolgte ich in den Osmotischen Untersuchungen (1877) als eine Hauptaufgabe die causale Aufhellung der osmotischen Druckkräfte in der Zelle, für welche ich in früheren Studien unerwartet hohe Werthe gefunden hatte. Diese damals physikalisch nicht erklärbare Thatsache führte mich, unter Berücksichtigung der in der Zelle obwaltenden Verhältnisse, auf die bestimmte physikalische Fragestellung: »Welche osmotische Druckkraft erzeugen gelöste Körper, speciell die sogenannten Krystalloide, wenn sie nicht diosmiren?«[1]) Die Versuche aber lehrten, dass unter diesen Umständen thatsächlich schon verdünnte Lösungen von Krystalloiden sehr ansehnliche osmotische Drucke erzeugen, wie das auch in der lebenden Zelle der Fall ist, in welcher in der gekennzeichneten Weise die Exosmose durch die Plasmahäute verhindert wird, denen die für Wasser und ungelöste Stoffe relativ sehr leicht durchlässige Zellhaut in bekannter Weise als Widerlage dient[2]). Vermöge ihrer ansehnlichen Cohäsion und unterstützt durch die an freien Flächen nicht geringen Krümmungsradien vermag aber die Zellhaut selbst einem osmotischen Druck von vielen Atmosphären genügenden Widerstand entgegenzusetzen[3]). Der Pflanzenzelle ist auch der physikalische Apparat darin nachgeahmt, dass in diesem die diosmotisch bestimmende, wenig resistente künstliche Niederschlagsmembran ihre Widerlage an der Wandung einer Thonzelle findet, welche Wasser und Salze leicht durchlässt.

Von der maximalen Leistung, die bei Mangel an Exosmose

---

1) Vgl. Osmotische Untersuchungen 1877, Vorwort.

2) Vgl. das vorige Kapitel und Pfeffer, Physiologie Bd. I, p. 50.

3) Pfeffer, Periodische Bewegungen 1875, p. 114; Nägeli und Schwendener, Mikroskop 1877, II. Aufl., p. 412. — Wenn in Diatomeen (O. Müller, Berichte d. botan. Gesellschaft 1889, p. 174) ein osmotischer Druck von 4—5 Atmosphären besteht, so ist bei der Kleinheit der Organismen ein Zusammenhalt der ineinandergreifenden zwei Schalen schon denkbar. Immerhin wird eine specielle Untersuchung diesen Punkt, sowie die mechanischen Ursachen der Erweiterung des Schalenabstands zu ermitteln haben.

erreicht wird, entfernen sich die osmotischen Drucke um so mehr, je ansehnlicher die abschliessende Haut den gelösten Körper passiren lässt. Da aber durch Thierblase, Pergamentpapier u. s. w. die Krystalloide leicht, die Colloide schwer oder auch fast gar nicht diosmiren, so ist selbstverständlich, dass die früheren Versuche mit derartigen Häuten die so ungleich höhere osmotische Leistung der Krystalloide nicht erkannten, für die bei gleicher Menge relativ nur wenig wirksamen Colloide dagegen osmotische Druckwerthe ergaben, welche von den in künstlichen Niederschlagsmembranen erhaltenen nicht sehr abweichen[1]).

In den früheren Versuchen mit relativ leicht durchlässigen Häuten war das Augenmerk wesentlich auf den relativen Austausch von Wasser und Salz, das endosmotische Äquivalent, gerichtet und der für das Verständniss des osmotischen Druckes einfachste und entscheidende Fall, dass nämlich nur Wasser passirt, kam nicht in Erwägung[2]). Auch führten aus den angedeuteten Gründen die nicht zahlreichen Druckmessungen zu der Annahme, dass gerade den colloidalen Körpern eine hohe osmotische Leistung zufalle. Doch waren

---

1) Zur Veranschaulichung mögen hier aus den Osmotischen Untersuchungen p. 73 folgende Zahlenwerthe einen Platz finden, die sich auf die in cm Quecksilber ausgedrückte Druckhöhe beziehen, welche 6procentige Lösungen der zu nennenden Stoffe in Pergamentpapier und in einer Niederschlagsmembran aus Ferrocyankupfer hervorbringen. Durch diese diosmirt aber Salpeter und so entspricht der zu 700 cm angegebene Werth nicht der maximalen osmotischen Leistung, die sich mit Bezug auf den Rohrzucker zu 1460 cm berechnet.

	Pergament-papier	$Cu_2\,Fe\,Cy_6$
Gummi arabicum	17,9 cm	25,9 cm
Flüssiger Leim	21,3 »	23,7 »
Rohrzucker	29,0 »	287,7 »
Salpeter	20,4 »	? (700) »

Die Bemerkung von Zott (Annal. d. Physik u. Chemie 1886, N. F., Bd. 27, p. 247), dass Colloide eine ziemliche osmotische Leistung besitzen, steht natürlich nicht im Widerspruch mit obigen Erfahrungen, wie es der Autor meint. Es kommt eben darauf an, welchen Maassstab man anlegt und im Vergleiche zu nicht diosmirenden Krystalloiden hat Zott keine Untersuchungen mit geeigneten Membranen angestellt.

2) Historisches vgl. Osmotische Untersuchungen, p. 96.

Digitized by Google

die für concentrirtere Lösungen gefundenen Werthe immer nur gering gegen die osmotischen Drucke, welche in Zellen auch dann bestehen, wenn nur verdünnte Lösungen von Krystalloiden vorliegen und also nicht geeignet, diese Thatsache zu erhellen. Freilich ist wohl begreiflich, dass vor Sicherstellung osmotischer Drucke bis zu mehreren Atmosphären die Frage nach der Entstehung solcher Spannung nicht in den Vordergrund trat. Und augenscheinlich hat man früher für die osmotischen Spannungen nicht gerade sehr hohe Werthe angenommen, wenn auch die Existenz solcher Spannung z. B. Nägeli (1855) wohl bekannt war.

Die von mir zur Aufhellung dieser Frage angestellten physikalischen Versuche waren, wie seiner Zeit mit Hinweis auf die weitergehende physikalische Bedeutung hervorgehoben wurde, von physiologischen Gesichtspunkten geleitet[1]) und mit Bezug auf diese führten sie auch zu einem allgemeinen Causalverständniss der hohen osmotischen Druckkräfte in Zellen[2]). Von physikalisch-chemischer Seite wurde dieser Gegenstand nach längerer Zwischenzeit aufgegriffen, nämlich durch van't Hoff, welcher wesentlich auf Grund meiner Versuche seine kinetische Theorie der Lösungen und des osmotischen Druckes entwickelte, nach welcher dieser, analog wie der Gasdruck, durch den Stoss der im Raume herumfliegenden Molekeln erzeugt wird. Bei der hohen Tragweite dieser Frage wird, wie sich schon zeigt, dieser Gegenstand nunmehr eingehender studirt werden, und aus solchen Studien sind zweifellos, mit Bezug auf physiologische Probleme, befruchtende Aufhellungen zu erwarten. Natürlich hat man aber in der Physiologie zunächst mit den Thatsachen zu rechnen, die durch kinetische oder statische Erklärung der osmotischen Vor-

1) Osmotische Untersuchungen, Vorwort.

2) Im Lichte unserer Zeit betrachtet würde allerdings auch schon früher ein gewisser Rückschluss auf osmotische Leistungen der Krystalloide möglich gewesen sein. Wie wenig indess damalige Auffassungen zu solchen Schlüssen geeignet waren, mag daraus erhellen, dass ein auch auf dem Gebiete der kinetischen Gastheorie (nunmehr verstorbener) bahnbrechender Physiker in wiederholten Besprechungen solche hohe osmotische Drucke durch verdünnte Lösungen von Krystalloiden für unmöglich erklärte und erst dann seine Ansicht änderte, als ich einige Zeit später die ersten gelungenen physikalischen Versuche vorführen konnte.

Digitized by Google

gänge nicht verrückt werden, so wichtig auch eine endgültige Entscheidung in diesen Fragen sowohl in theoretischer Hinsicht, als auch mit Rücksicht auf den weiteren Ausbau des Problems ist.

Physiologisch wichtig ist, dass der osmotische Druck nur von der Natur und der Menge des gelösten Stoffes, nicht aber von Qualität und Dicke der abschliessenden Haut abhängt. Wenigstens gilt dieses so lange der gelöste Körper nicht diosmirt, die Haut aber nach beiden Seiten gleich durchlässig ist und, wie es für todte Häute ja immer zutrifft, durch active Thätigkeit keine einseitige Wasserbeförderung bewirkt.

Unter diesen Umständen beeinflusst eine Beschleunigung oder Verminderung der Filtrationsschnelligkeit, mag diese durch Dicke der Haut, durch Dimensionsänderung der intermicellaren Räume oder anders erreicht werden, die einwärts und auswärts gerichtete Wasserbewegung in gleichem Verhältniss. Da aber bei Gleichheit dieser entgegengesetzten Wasserbewegung stets die endliche Druckhöhe erreicht ist, so kann diese in keiner Weise von dem Filtrationswiderstande der abschliessenden Haut abhängen, durch welchen nur die Herstellung des Gleichgewichtszustandes beschleunigt oder verzögert wird. Dieser Schluss ist unabhängig von jeder Theorie der Osmose, gilt also ebensowohl, wenn die gelösten Stoffe durch Wasseranziehung oder rein kinetisch wirken. Auch würde ich kaum Veranlassung haben, auf dieses wiederholt betonte Verhältniss[1]) zurückzukommen, wenn nicht in botanischen Schriften immer wieder die physikalisch irrige Annahme auftauchte, dass der osmotische Druck durch Steigerung der Filtrationsschnelligkeit der Plasmahaut (oder des ganzen Protoplasten) für Wasser vermindert und im umgekehrten Falle gesteigert werde[2]).

Aber auch die Qualität der Haut kann, so lange gelöste Stoffe nicht exosmiren, den osmotischen Druck nicht beeinflussen und meine frühere gegentheilige Annahme, die sich der allgemein verbreiteten Vorstellung anschloss, ist demgemäss irrig.

Bei kinetischem Ursprung des osmotischen Druckes muss dieser,

---

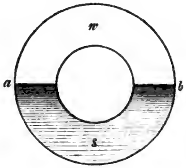
1) Pfeffer, Osmotische Untersuchungen 1877, p. 78, 183; Pflanzenphysiologie Bd. I, p. 53; Bd. II, p. 241.

2) Vgl. z. B. Sachs, Vorlesungen über Pflanzenphysiologie 1887, II. Aufl., p. 684.

Digitized by Google

ebenso wie der Gasdruck, selbstverständlich mit gleicher Energie gegen jede beliebige Wand wirken. So lange aber diese kinetische Auffassung nur Hypothese ist, kann man auf sie den obigen Schluss nicht bauen, welcher indess durch folgende Überlegung ganz allgemein und zwingend erwiesen wird.

Man denke sich in eine ringförmige Glasröhre (vgl. nebenstehenden Holzschnitt) die Häute *a* und *b* eingesetzt, die von verschiedener Qualität, beide aber für den in *s* gelösten Stoff undurchlässig, dagegen durchlässig für Wasser sind, welches in reiner Form den Raum *w* erfüllt. Würde nun der in homogener Lösung gedachte Stoff in alleiniger Absperrung durch die Haut *a* einen höheren Druck erzeugen als in Berührung mit der Wand *b*, so müsste mit der besagten Zusammenstellung beider Häute in dem communicirenden Glasrohr in *s* eine zwischen beiden Druckgrössen liegende osmotische Spannung sich einstellen. Dann fiele aber mit Bezug auf Wasser für *b* der Quotient von Einstrom in den Ausstrom grösser, für *a* kleiner als 1 aus und so müsste dauernd Wasser in der Richtung von *s* durch *b* nach *w*, *a* und *s* circuliren. Das wäre aber ein Perpetuum mobile und mit der Unmöglichkeit dieses folgt also, dass die trennende Haut, mag diese fest, flüssig oder sonstwie beschaffen sein, durch ihre Qualität den von einem nicht diosmirenden Stoff erzielten osmotischen Druck nicht beeinflussen kann. Natürlich ist aber eine solche circulirende Wasserbewegung durch Aufwand von Energie möglich, mag diese nun durch dauernde Unterhaltung ungleicher Concentration unter *a* und *b*, durch Temperaturdifferenz oder in irgend anderer Weise die Betriebskraft schaffen.



Diese unbedingt zwingende ganz allgemeine Schlussfolgerung gilt ganz ebenso für die Zelle, also auch für den Protoplast und die Plasmahäute. In der lebensthätigen Zelle steht aber thatsächlich Arbeitskraft zur Verfügung, die in irgend einer zur Zeit nicht controlirbaren Weise auf Abweichungen von dem für den statischen Zustand gültigen osmotischen Druck hinarbeiten könnte, sei es durch Unterhaltung ungleicher Concentration, durch eine active einseitige Beförderung von Wasser oder durch irgend andere Vorgänge (vgl.

p. 283). In diesem Sinne ist die Frage noch nicht Gegenstand exacter Untersuchung gewesen, doch sprechen unsere Erfahrungen dafür, dass bei der lebensthätigen Zelle normalerweise entweder nur der für den statischen Zustand gültige osmotische Druck besteht oder doch die Abweichungen so gering sind, dass sie der Beobachtung sich entzogen. In dieser Hinsicht ist namentlich hervorzuheben, dass mit Entziehung des Sauerstoffs, also mit partieller Sistirung der normalen Functionen, der osmotische Druck unverändert bleibt[1]). Ferner haben noch zu erwähnende Versuche mit verschiedenen Pflanzen den gleichen relativen osmotischen Werth für verschiedene Stoffe ergeben, wobei allerdings nicht zu vergessen ist, dass bei solchen plasmolytischen Eingriffen besondere active Leistungen sistirt werden und so der Beobachtung entgehen können. Sollte aber in der That eine Abweichung von dem gekennzeichneten physikalischen Gesetze gefunden werden, so würde eben die Forschung nach Aufdeckung der Ursache zu streben haben.

Wohl wesentlich, weil ich in üblicher Weise den Einfluss der Haut auf die osmotische Druckleistung als selbstverständlich ansah, unterzog ich diese Frage früher nicht genügender Prüfung und kam so in dieser Hinsicht zu einer irrigen Annahme[2]). Übrigens führten doch allgemeine Erwägungen zu dem Schlusse, dass Variationen der Plasmahaut keine sehr erheblichen Druckschwankungen in der lebenden Zelle erzielen dürften[3]). Der Einfluss der Haut auf die Constitution der Lösung an der Contactfläche[4]) kommt hier nicht in Betracht, da durch diese die einwärts wie die auswärts gehende Wasserbewegung in gleichem Verhältniss betroffen wird. Auf die Versuche mit Membranen aus Berlinerblau und Calciumphosphat[5]), die für einen Einfluss der Haut zu sprechen schienen, ist auch in den Osmotischen Unter-

1) Vgl. Pfeffer, Physiologie I, p. 378; II, p. 2. Auch Osmotische Untersuchungen 1877, p. 193, Anmerkung. — Auch später vorgenommene Versuche ergaben für die Staubfäden von Centaurea Constanz der Länge nach Verdrängung des Sauerstoffs, obgleich bei diesen Filamenten vermöge der ungewöhnlich grossen elastischen Dehnbarkeit schon geringere Turgorschwankungen eine für mikrometrische Messung wahrnehmbare Veränderung der Länge erzielen müssten. Wenn in den Gelenken von Mimosa pudica (Physiol. Unters. 1873, p. 65) beim Chloroformiren der Turgor etwas zu steigen scheint, so ist dieses einmal noch nicht endgültig erwiesen und könnte ausserdem auch aus Stoffwechselvorgängen resultiren.

2) Osmotische Untersuchungen 1877, p. 80, 116, 179.

3) l. c., p. 178, 185 u. s. w.

4) Ebenda, p. 49.

5) Ebenda, p. 80, 116.

Digitized by Google

suchungen kein besonderes Gewicht gelegt, da bei so vereinzelten Experimenten schon die Technik der Herstellung dieser Häute nicht so ausgebildet war und da selbst sehr geringe Discontinuitäten in der Membran oder gewisse Exosmose des Stoffes u. s. w. recht wohl die Ursache gewesen sein können, dass für Rohrzucker eine geringere Druckleistung sich ergab, als in Membranen aus Ferrocyankupfer, mit denen übrigens auch kleinere Variationen erhalten wurden.

Demgemäss wird durch die physikalische Methode die rein osmotische Leistung nicht diosmirender Stoffe in Berührung mit Vacuolenhaut oder Hautschicht mit einer Genauigkeit bestimmt, welche physiologische Methoden vielleicht nie erreichen lassen. Nach den physikalischen Erfahrungen können aber auch alle diejenigen rein osmotischen Veränderungen der osmotischen Leistung bemessen werden, welche Concentration, Temperatur und andere Umstände herbeiführen und falls die am lebenden Organismus beobachteten Erfolge sich diesen physikalischen Forderungen nicht anschliessen, ist daraus mit Sicherheit zu entnehmen, dass neben den statischen osmotischen Vorgängen noch andere den Druck u. s. w. verändernde Factoren mitspielen. Bis dahin sind die osmotischen Drucke, welche bekannte Stoffmengen in der lebenden Zelle liefern, noch nicht mit der wohl erreichbaren Genauigkeit bestimmt, die vorliegenden Erfahrungen stimmen indess mit den physikalisch gewonnenen Werthen so weit überein, als es bei solcher Sachlage erwartet werden kann. So wird auch hierdurch wahrscheinlich gemacht — was volle Übereinstimmung streng beweisen würde — dass die Turgorgrösse der Pflanzenzellen wesentlich nur den statischen osmotischen Leistungen der gelösten Stoffe entstammt.

Zweifellos lassen sich für den osmotischen Druck genauere Werthe ermitteln, als sie meine ersten derartigen physikalischen Versuche gewähren, in denen ich nicht bestrebt war eine noch grössere Präcision zu erzielen. Diese Versuche ergaben mit Membran aus Ferrocyankupfer für eine 1procentige Lösung des durch diese Haut nicht merklich diosmirenden Rohrzuckers bei 13,0—16,0° C. einen osmotischen Druck zwischen 47,1 bis 53,8 cm Quecksilber (= 0,62 bis 0,71 Atmosphären)[1]. Mit Vernachlässigung des spe-

1) Osmotische Untersuchungen 1877, p. 79. — Derartige Versuche wurden bis dahin nur noch von Ladenburg ausgeführt, die für 1 % Rohrzuckerlösung 47,6—47,9 cm Quecksilber ergaben (Berichte d. chem. Gesellschaft 1889, p. 1226).

Digitized by Google

cifischen Gewichts dieser Lösung (= 1,004) berechnet sich für die Lösung, welche 0,1 Molekel (= 34,2 gr) Rohrzucker im Liter enthält[1]), ein osmotischer Druck von 160,7 bis 184 cm (Mittel 172) und für 0,1 Molekel (= 10,1 gr) Salpeter im Liter (isotonisch mit 0,1 . $^2/_3$ Molekel Rohrzucker) von 241 bis 276 cm Quecksilber (3,2—3,6 Atmosphären). Als Mittelwerth ergiebt sich hieraus für 0,1 Molekel Salpeter ein osmotischer Druck von 258 cm Quecksilber oder von 3,4 Atmosphären. Einer 1procentigen Salpeterlösung würde demnach ein osmotischer Druck von 3,37 oder rund 3,4 Atmosphären, einer 1procentigen Rohrzuckerlösung von 0,67 Atmosphären entsprechen.

Mit Rücksicht auf die wahrscheinliche Richtung der Versuchsfehler dürften die gefundenen Werthe öfter zu niedrig als zu hoch ausgefallen sein. Wenn der osmotische Druck ganz genau den Boyle-Mariotte'schen Gasgesetzen folgt, so würde er bei 15° C. für die 1proc. Rohrzuckerlösung sich auf 52,1 cm Quecksilber beziffern[2]), ein Werth, der immerhin zufriedenstellend mit den empirisch gefundenen Zahlen übereinstimmt. Hiernach würde also die osmotische Leistung in den oben genannten Mittelwerthen sogar ein wenig zu gering bemessen sein.

Aus den, wie schon gesagt, noch nicht mit erreichbarer Exactheit durchgeführten physiologischen Methoden berechnen sich für 0,1 Molekel Salpeter osmotische Drucke von 2 bis 3 Atmosphären und verschiedene Experimente weisen auch auf noch höhere Leistung hin[3]). Nach der erwiesenen directen Anwendbarkeit der physikalischen Erfahrungen auf die Zelle, werden wir also fernerhin als osmotischen Druck für 0,1 Molekel Salpeter bei mittlerer Temperatur, nicht mehr, mit de Vries (l. c.), 3 Atmosphären, sondern 3,4 Atmosphären

1) Vgl. de Vries, Jahrb. f. wiss. Botanik 1884, Bd. 14, p. 537, 529.

2) Falls der osmotische Druck ganz den Gasgesetzen folgt, so muss der von 0,1 Molekel gelöstem Zucker erzielte Druck gleich dem sein, welchen 0,1 Molekel Wasserstoff oder Sauerstoff in Gasform in demselben Raum ausüben. Mit Berücksichtigung dieses und der entsprechenden Wasserstoffmenge, die $^2/_{342}$ mal kleiner ist als Zucker (die Molekulargewichte sind 2 und 342) hat man also die Mittel, um den Druck zu bestimmen, welchen bei gegebener Temperatur diese in den gleichen Raum gepresste Wasserstoffmenge ausübt. Vgl. van 'tHoff, Zeitschrift f. physikal. Chemie 1887, Bd. I, p. 482; auch Ostwald, Grundriss d. allgem. Chemie 1889, p. 131.

3) Vgl. de Vries, l. c., p. 529.

Digitized by Google

(vielleicht auch 3,5 Atmosphären) anzunehmen haben und dieser angenäherte Werth genügt den physiologischen Bedürfnissen so lange, als nicht weitere Studien grössere Präcision erfordern.

Da aber bekanntlich bei Einwirkung von genügend concentrirter Salzlösung sich das Protoplasma contrahirt und bis zur isosmotischen Gleichstellung des Zellsaftes verkleinert, so ist mit der zur Aufhebung des Turgors, also zur eben merklichen Plasmolyse nöthigen Concentration, wie schon Nägeli (1855) erkannte, die osmotische Leistung des Zellsaftes bemessen. Der geringe Centraldruck, der letzterem entgegen steht, kommt praktisch nicht in Betracht und übrigens wird, nach den früheren Erörterungen durch die plasmolysirende Lösung von Salpeter oder Zucker diejenige osmotische Kraft bestimmt, welche in den in Wasser liegenden Zellen als wirklicher Druck gegen die Zellhaut wirkt (vgl. p. 295).

In verdünnten Lösungen steigt der osmotische Druck nach den bisherigen Erfahrungen annähernd proportional der Concentration[1], also, wie bei Gasen, mit der Zahl der Molekeln im Volumen. Für höhere Concentrationen gilt indess dieses Gesetz nicht mehr, und nach physikalisch-chemischen Erwägungen, welche in Versuchen mit Rohrzucker ihre Bestätigung finden, wächst weiterhin der osmotische Druck schneller als die Concentration. Innerhalb der in Zellen zumeist gebotenen Turgorgrössen wird man im allgemeinen, wenigstens für Krystalloide, und also auch für die zur Plasmolyse nöthigen Lösungen dieser, Proportionalität zwischen Druck und Concentration ohne besonderen Fehler annehmen dürfen. Doch ist dieses in gegebenen Fällen nicht mehr zulässig, so z. B. nicht für die auf 50procentiger Traubenzuckerlösung erwachsenen Schimmelpilze, deren Turgor isosmotisch mit ungefähr 38% Natriumnitrat (= 45,1% Kaliumnitrat) gefunden wurde[2].

1) Pfeffer, Osmotische Untersuchungen 1877, p. 64, 81, 175. — Versuche mit diosmirenden Körpern müssen natürlich andere Resultate ergeben.

2) Eschenhagen, Einfluss von Lösungen verschiedener Concentration auf das Wachsthum von Schimmelpilzen 1889, p. 22. — 45% Kaliumnitrat entwickeln unter Annahme von Proportionalität einen osmotischen Druck von 153 Atmosphären. Durch den hohen osmotischen Druck werden übrigens die Zellen dieser Pilze gesprengt, wenn sie direct aus dem concentrirten Nährmedium in Wasser übertragen werden.

Digitized by Google

Auch für die concentrirten Lösungen der Colloide, welche ja nur relativ geringen osmotischen Druck erzielen, dürfte besagte Proportionalität nicht mehr gelten und nach den wenigen Erfahrungen mit arabischem Gummi[1]) werden fernere Versuche erst zu entscheiden haben, ob nicht überhaupt bei colloidalen Körpern noch weitere Abweichungen bezüglich des Verhältnisses zwischen Concentration und osmotischer Leistung vorkommen.

So lange nicht besondere Umsetzungen oder Einflüsse in Betracht kommen, scheint in Gemischen (analog wie bei Gasen) der osmotische Druck der Summe der Leistungen der einzelnen Körper zu entsprechen[2]). Es gilt dieses auch für Colloide und deren Vereinigung mit Krystalloiden, somit auch für das Protoplasma, in welchem ausserdem die Existenz gequollener Massen die osmotische Leistung der gelösten Körper nicht hindert.

Nachdem ich empirisch eine gewisse Zunahme des Druckes mit der Temperatur gefunden hatte[3]), zeigte späterhin van't Hoff[4]), dass die in diesen freilich nicht zahlreichen Versuchen ermittelten Werthe recht gut den für Gase gültigen Beziehungen entsprechen, dass der osmotische Druck also proportional der absoluten Temperatur zunimmt. Demgemäss haben geringe Temperaturschwankungen keine sehr ansehnlichen Druckschwankungen zur Folge, denn ein osmotischer Druck von 100 muss nach diesen Gesetzen auf 103,67 steigen, wenn die Temperatur um 10° C. erhöht wurde. Ist aber dieses Gesetz für alle Lösungen gültig, so wird natürlich mit der Temperatur nicht das isosmotische Gleichgewicht zwischen zwei getrennten Lösungen gestört und demgemäss bleibt auch aus diesen Gründen das Volumen eines plasmolysirten Protoplasten mit der Temperaturschwankung unverändert, wie das Versuche Hamburger's[5]) mit weissen Blutkörperchen ergaben.

Insofern aber in Organismen der osmotische Druck sich in einem anderen Verhältniss mit der Temperatur ändert, müssen irgend welche

---

1) Pfeffer, l. c.

2) Pfeffer, l. c., p. 67. Vgl. auch diese Abhandlung p. 238.

3) Pfeffer, l. c., p. 83.

4) Zeitschrift f. physikal. Chemie 1887, Bd. I, p. 486.

5) Archiv f. Anatomie u. Physiologie, Abtheilung Physiologie 1886, p. 476; 1887, p. 31. Vgl. van 'tHoff, l. c., p. 487.

Digitized by Google

Umstände mit eingreifen, mögen diese in Veränderungen der osmotisch wirksamen Substanzen, in eingeleiteter Exosmose oder in anderen Momenten zu suchen sein. In dieser Hinsicht hat die Prüfung dieser Fragen an lebendigen Organismen ein vielseitiges Interesse und die allerdings sehr unzureichenden Beobachtungen lassen vermuthen, dass der Turgor innerhalb günstiger Temperatur nur wenig mit dieser variirt, mit Temperaturextremen aber in manchen Objecten plötzlich schneller, also aus anderen als den statischen Verhältnissen, sinkt[1]).

Es ist hier keine Veranlassung, näher auf die physiologischen Methoden einzugehen, hinsichtlich deren ich auf de Vries[2]) verweise. Dem Wesen nach laufen diese Ermittelungen des osmotischen Druckes darauf hinaus, den Turgor ganz oder partiell aufzuheben (durch Plasmolyse, Welken, Tod oder auch durch Reizvorgänge) und das zur Wiederausdehnung auf die ursprüngliche Länge nothwendige Gewicht als Maass für die Turgorleistung zu benutzen[3]). Sofern nun diese Verkürzung, bei gerade vollständiger oder auch nur partieller Herabsetzung des Turgors, durch eine bekannte Lösung erzielt wurde, ist somit durch jenes spannende Gewicht auch die osmotische Leistung dieser Lösung bemessen. Ohne hier eine Kritik der dabei zu beachtenden Fehlerquellen geben zu wollen, sei nur darauf aufmerksam gemacht, dass z. B. nicht leicht diejenige Querschnittsfläche genau zu bestimmen ist[4]), auf welche der dehnende osmotische Druck thatsächlich wirkte, und ferner die Dehnbarkeit in Gewebecomplexen von Factoren abhängt, die sich mit sinkendem Turgor in einer nicht sicher bestimmbaren Weise ändern[5]). Immerhin würde es möglich sein, bei richtiger Auswahl der Objecte und kritischer Beachtung der Fehlerquellen ziemlich genaue Werthe für den osmotischen Druckwerth bestimmter Lösungen zu ermitteln.

Die seiner Zeit von mir angewandte physikalische Methode bedarf hier keiner Erörterung. Von den zu Bestimmungen benutzten krystalloiden Körpern diosmirte Rohrzucker, wenigstens in verdünnten Lösungen, nicht in merklicher Weise, während mit Kaliumnitrat und Kaliumsulfat, der Exosmose halber, die maximale Druckleistung in den Membranen aus Ferrocyankupfer nicht bestimmt werden konnten[6]). Übrigens dringt Salpeter auch

1) Vgl. Pfeffer, Physiologie Bd. I, p. 42, 275.

2) L. c., p. 529.

3) Vgl. auch Pfeffer, Physiologie I, p. 54 und Bd. II, p. 20.

4) Vgl. z. B. Pfeffer, Physiolog. Untersuchungen 1873, p. 120.

5) Vgl. Pfeffer, Physiologie Bd. II, p. 17 und die dort citirte Literatur.

6) Osmot. Untersuchungen p. 48, 73. Tamman (Annal. d. Physik u. Chemie 1888, N. F., p. 310) findet die Ferrocyankupfermembran für Kalisulfat impermeabel. Es ist dieses indess bei der geringen Durchlässigkeit für diesen Körper wohl mit meinen Befunden vereinbar.

Digitized by Google

durch die Plasmahaut und in manchen Pflanzen sogar in ziemlicher Menge (p. 285).

Um, wie es für die physikalische Chemie jetzt sehr erwünscht wäre, osmotische Drucke leicht und sicher bestimmen zu können, muss jedenfalls eine leichter und schneller zu handhabende Methode erstrebt werden und eine solche würde ebenso für Ermittlung relativer osmotischer Werthe von Bedeutung sein, da die plasmolytische Methode an lebenden Zellen immer nur begrenzte Genauigkeit bietet und nicht für alle Stoffe und Concentrationen anwendbar ist [1]. Beabsichtige ich auch nicht selbst ein solches Ziel ins Auge zu fassen, so können doch vielleicht einige Winke Anderen von Nutzen werden. Will man bei Thonmasse (Zellen oder Platten) als Widerlage bleiben, so dürfte die Anbringung von Glasurringen vortheilhaft sein, um, ohne Einkittung, die nöthigen Verschlussstücke, etwa mittelst Gummistopfen oder Gummiplatten, ansetzen zu können. Vielleicht lässt sich aber Pergamentpapiermasse, unter genügender Ausstreifung, vortheilhafter verwenden, insbesondere so lange es um geringere Concentrationen resp. Drucke sich dreht, die zunächst das Hauptinteresse bieten.

Am vortheilhaftesten dürfte es aber sein, wenn es gelänge, die diosmotische Absperrung durch eine Masse zu erreichen, welche, analog wie das Protoplasma, keine äusseren Membranogene bedarf, um sich in dauernder Continuität zu erhalten. Unter verschiedenen Möglichkeiten erinnere ich daran, dass genügend dünne Öllamellen vielleicht ausreichend durchlässig für Wasser sind und möglicherweise ist durch Ausbreitung von Öl, durch Herstellung von Häuten aus ölhaltigem Collodium u. s. w. ein solches Ziel zu erreichen. Für andere flüssige Medien mag auch Kautschuk von Bedeutung werden können. Die Herstellung genügender Widerlage und eine Beschleunignng der Messung, die bei geringeren Drucken zu offenen und einstellbaren Manometern greifen wird, kann in keinem Falle besondere Schwierigkeiten bieten.

Zur Bestimmung isosmotischer Werthe in Niederschlagsmembranen wurde von Tammann [2] in ingeniöser Weise der Schlierenapparat verwandt, doch dürfte auch diese Methode kaum zu allgemeinster Verwendung für chemische Zwecke geeignet sein.

1) Wie weit Ladenburg eine genügende Vereinfachung erreicht hat, ist aus der bisherigen Veröffentlichung (Berichte d. chem. Gesellschaft 1889, p. 1225) nicht zu ersehen.

2) L. c., p. 300. — Einige Versuche, den Schlierenapparat nutzbar zu machen, um z. B. die Orte des Stoffaustausches, die Abgabe von Wasserdampf, ätherischen Ölen u. s. w. näher zu bestimmen, führten zu keinem befriedigenden Resultat. Allerdings konnte ein ansehnlicher Austausch, wie solcher bei Verwundung, Plasmolyse u. s. w. erzielt wird, durch Schlieren erkannt werden, doch führte der langsamere Austausch von Wurzeln, selbst wenn diese aus ver-

Digitized by Google

Mit den in den Osmotischen Untersuchungen niedergelegten Studien war, neben der Aufdeckung des osmotischen Systems in der Zelle, der bisher unverständliche hohe osmotische Druck in Zellen auf physikalischen Boden gestellt. Mit Bezug auf die Qualität der bewirkenden Stoffe hatte sich für Krystalloide eine hohe, für Colloide eine relativ geringe osmotische Leistung ergeben und ferner liess sich aus den Erfahrungen ableiten, dass zwar im Allgemeinen bei gleicher Concentration schneller diffundirende Körper einen höheren osmotischen Druck erzielen, als langsamer diffundirende, jedoch eine Proportionalität zwischen Diffusionsconstanten und osmotischem Druck nicht besteht[1]).

Musste demgemäss, ebenso wie bezüglich der Diffusion, irgend eine Beziehung zwischen der Molekulargrösse der gelösten Stoffe und den hiermit verknüpften Functionen mit Sicherheit erwartet werden, so wurden doch erst von de Vries[2]) die wahren Beziehungen zum Molekulargewicht aufgedeckt.

Aus ausgedehnten Studien über die Concentrationen verschiedener Stoffe, welche gleiche plasmolytische Wirkung an Pflanzenzellen erzielen, ermittelte de Vries (l. c.) dass die isotonischen (isosmotischen) Coefficienten 2, 3, 4 und 5 die relativen osmotischen Leistungen äquimolekularer[3]) Lösungen ausdrücken. Ein Körper welchem, wie Zucker, der Coefficient 2 zukommt, wird also nur $^2/_3$ der osmotischen Leistung des Salpeters (Coefficient 3) erzielen, wenn Lösungen ange-

---

dünnten Lösungen zur Deckung der Transpiration der Pflanze ansehnliche Wassermengen aufzunehmen hatten, keine genügend hervortretenden Lichtbrechungsdifferenzen in dem anstossenden Medium herbei. Übrigens genügte das von mir benutzte Instrument bezüglich der Empfindlichkeit den höchsten von Töpler (Poggendorf's Annalen 1867, Bd. 131, p. 33) gestellten Anforderungen. — Über Verbindung des Schlierenapparates mit dem Mikroskop vgl. Lehmann, Molekularphysik Bd. I, p. 11; Exner, Zeitschrift f. Instrumentenkunde 1886, p. 139 und Seibert, ebenda 1882, p. 92.

1) Pfeffer, Osmotische Untersuchungen 1877, p. 52, 61, 76 u. s. w. — Die Gründe für diese Abweichung können hier nicht entwickelt werden. Vgl. übrigens Lothar Meyer, Die modernen Theorien d. Chemie 1883, IV. Aufl., p. 315; Ladenburg, Handwörterbuch d. Chemie 1885, Bd. 3, p. 285. Ferner z. B. Nernst, Zeitschrift f. physik. Chemie 1888, Bd. II, p. 613 u. a.

2) Jahrbücher f. wiss. Botanik 1884, Bd. XIV, p. 427.

3) Über diese vgl. z. B. Ostwald, Grundriss d. allgem. Chemie, p. 138.

Digitized by Google

wandt werden, welche in Grammen je 0,1 Molekulargewicht im Liter enthalten[1]). Solche Relationen waren bereits, besonders für die Gefrierpunktserniedrigung, durch Raoult bekannt[2]) und haben sich mehr und mehr für diese, sowie für Dampfspannung, Siedepunkt, elektrische Leitungsfähigkeit ergeben, so dass alle diese Eigenschaften als verschiedene Äusserungen der in der Lösung der Körper gebotenen Verhältnisse, resp. der Zahl der Molekeln im Volumen erscheinen.

Die nähere Aufhellung dieser Erscheinungen und Beziehungen aus den allgemeinen Eigenschaften der Materie muss der physikalisch-chemischen Forschung überlassen bleiben[3]) und kann nicht Aufgabe der Physiologie sein, die in dem schon angedeuteten Sinne zunächst mit Thatsachen zu rechnen und die Erfahrungen der Hülfswissenschaften sich dienstbar zu machen hat. Die besonders seit Dutrochet zunächst mehr geahnte als klar erkannte hohe Bedeutung der diosmotischen Vorgänge für pflanzliche und animalische Organismen macht aber sehr wohl verständlich, dass die Kenntniss der diosmotischen und osmotischen Vorgänge wesentlich den aus physiologischer Anregung entstandenen Studien entstammt[4]). Dieses gilt ebenso für den osmotischen Druck und die Beziehung der relativen osmotischen Leistung zum Molekulargewicht.

Die relative Leistung kennzeichnet natürlich für sich nicht den osmotischen Druck, der in der besprochenen Weise ermittelt wurde und natürlich für isosmotische Lösungen denselben Werth hat. Speciell

---

1) Näheres vgl. de Vries, l. c., p. 511.

2) Vgl. dazu de Vries, l. c., p. 521. — Ferner van't Hoff, Zeitschrift f. physikal. Chemie 1887, Bd. I, p. 493 und ebenda 1889, Bd. III, p. 198; Ostwald, Grundriss d. allgem. Chemie 1889, p. 132 ff. und 271 ff.; de Vries, Zeitschrift f. physik. Chemie 1889, Bd. III, p. 109; Tamman, Annal. d. Physik u. Chemie 1888, N. F., Bd. 34, p. 315. — Natürlich kann umgekehrt aus der relativen oder absoluten osmotischen Leistung auf das Molekulargewicht im gelösten Zustand geschlossen werden, wie das auch schon von de Vries u. A. geschah.

3) Ich gehe demgemäss hier auch nicht auf die Annahme von Dissociationen ein, die nöthig sind, um die besagten Eigenschaften der Lösungen in Einklang mit Avogadro's Gesetz zu bringen. Vgl. übrigens Ostwald, Grundriss d. physik. Chemie 1889, p. 273, 284. — Bezüglich der Abweichungen der Chloride der Erdalkalien siehe auch van't Hoff, Zeitschrift f. physik. Chemie 1889, Bd. III, p. 198.

4) Historisches vgl. Pfeffer, Osmotische Untersuchungen 1877, p. 96.

Digitized by Google

mit Rücksicht auf den zähflüssigen Protoplasmakörper wurde von Nägeli[1]) in fundamentaler Hinsicht klar erkannt, dass eine plasmolysirende Lösung in solchem relativen Sinne die osmotische Leistung des Zellsaftes bemisst und dass, der ungleichen Leistungsfähigkeit entsprechend, zur Erzielung gleicher Plasmolyse an derselben Zelle von verschiedenen Stoffen Lösungen entsprechend ungleicher Concentration nöthig sind. Den Principien nach wurden diese Fragen mit Bezug auf das osmotische System, die Volumschwankungen in den einzelnen Gliedern dieses und sonstige Verhältnisse späterhin auch von mir[2]) behandelt. Eine annähernde empirische Ermittlung relativ osmotischer Werthe hatte schon früher de Vries[3]) begonnen, der späterhin[4]) in weiterer Ausführung und Präcisirung solcher Versuche, wie schon gesagt, auch die Beziehung der osmotischen Leistung zum Molekulargewicht erkannte.

Ergiebt sich bei Verwendung differenter Pflanzen dieselbe Scala für die relative osmotische Leistung ungleicher Körper, so darf man, wie ich früher erörterte, mit Bezug auf den Druck, auf osmotische Gleichwerthigkeit der Plasmamembrane der Pflanzen schliessen und durch die entsprechenden von de Vries erhaltenen Resultate ist demgemäss solche Gleichwerthigkeit für die Plasmahaut wahrscheinlich gemacht worden. Allgemeinheit aber erhält dieser Schluss erst mit dem in dieser Arbeit geführten Nachweis, dass die Qualität der Haut, so lange Diosmose nicht stattfindet, keinen Einfluss auf die Höhe des osmotischen Druckes hat. Erst damit ist es auch zulässig, nach den physikalischen Resultaten die Druckhöhe in lebenden Zellen genau zu bemessen, was sachgemäss nicht zulässig war, so lange an einen Einfluss der abschliessenden Haut geglaubt wurde[5]).

Die Turgorhöhe wird natürlich durch die zur eben merklichen Plasmolyse nöthige Concentration von Zucker, Salpeter oder irgend

1) Pflanzenphysiol. Untersuchungen 1855, I, p. 22 ff. (vgl. z. B. p. 24 und 31). Dass Nägeli noch nicht das Wort »Plasmolyse« benutzte, thut natürlich nichts zur Sache.

2) l. c., p. 77 und diese Abhandlung p. 291.

3) Sur la perméabilité du protoplasma etc. Archives Néerlandaises 1871, Bd. VI, p. 7 des Separatabdrucks.

4) Jahrb. f. wiss. Botanik 1884, Bd. XIV, p. 427.

5) Vgl. Pfeffer, l. c., p. 178.

Digitized by Google

einem anderen Stoff immer bestimmt, wenn nur die osmotische Druckleistung des Körpers irgendwie direct oder relativ, d. h. nach isosmotischer Wirkung, bekannt ist. Auch nur auf Grund solcher empirisch festgestellten Relationen war die Beziehung zwischen osmotischem Druck und Molekulargewichtsverhältnissen zu folgern; mit dieser Abstraction ist aber eine in vieler Hinsicht sehr wichtige Erkenntniss gewonnen. Abgesehen von der allgemeinen wissenschaftlichen Bedeutung sei hier in physiologischer Hinsicht nur daran erinnert, dass sich die osmotische Leistung für noch nicht geprüfte Stoffe zumeist voraussagen lässt und in jedem Falle die empirische Bestimmung, die gewöhnlich nur das Molekulargewicht oder ein Multiplum dieses zu beachten hat, sehr vereinfacht wird. Weiter ergiebt sich aus den Erfahrungen, dass Säure und Metall in verschiedenen Verbindungen denselben partiellen Coefficienten bewahren und demgemäss eine gewöhnliche wechselseitige Umsetzung keine Druckänderung erzielt, denn diese bleibt z. B. dieselbe, ob in der Lösung Kaliumnitrat und Chlorcalcium oder Kaliumchlorid und Calciumnitrat angenommen werden[1]. Diese und andere Verhältnisse werden jedenfalls am übersichtlichsten und anschaulichsten, wenn wir mit van't Hoff die Hypothese Avogadro's auf die Lösungen ausdehnen. Dem entsprechend befindet sich in isosmotischen Lösungen (analog wie bei gleichem Gasdruck) die gleiche Anzahl von Molekeln und sofern der osmotische Druck dem für den ungelösten Körper angenommenen Molekulargewicht nicht entspricht, ist dieses (ebenso wie in Gasen) durch Dissociation oder durch Molekularvereinigungen zu erklären, durch welche die Zahl der Molekeln vermehrt oder vermindert wurde[2].

Abgesehen von Zufuhr oder Abfuhr von Stoffen werden aber auch durch einfache Umsetzungen oder molekulare Vereinigungen in der lebenden Zelle Variationen des osmotischen Druckes erzielt werden und in dieser Hinsicht bestehen die diesbezüglichen Erwägungen

1) Vgl. de Vries, l. c., 519.

2) Vgl. z. B. Ostwald, Grundriss d. physikal. Chemie 1889, p. 52, 131. Ferner die citirten Arbeiten von van't Hoff, Nernst u. s. w. — Die an die Molekulartheorie sich anschliessenden osmotischen Leistungen gehören demgemäss zu den von Ostwald (l. c., p. 57) colligativ genannten Eigenschaften.

Digitized by Google

in den Osmotischen Untersuchungen (p. 185) zu vollem Rechte[1]). Wie eine unlösliche Ausscheidung, wird im Allgemeinen die Umwandlung eines Krystalloids zu einem Colloid, das wahrscheinlich als irgend ein Aggregat von Molekeln aufzufassen ist, eine Verminderung, der umgekehrte Process aber eine Steigerung des osmotischen Druckes herbeiführen[2]). Bei dem zum Theil unbekannten Complex in der lebenden Zelle kann man keineswegs aus der Existenz eines Stoffes seine molekularen Verhältnisse in Lösung voraussagen und die diesbezüglichen Andeutungen, welche bei Besprechung der Stoffanhäufung gemacht wurden (p. 287), kommen ebenso für die osmotische Druckleistung in Betracht.

Bei Kenntniss der Zusammensetzung des Zellsaftes wird aber bei Vergleich der Summe der Einzelleistungen und der osmotischen Gesammtleistung in der lebenden Zelle eine Entscheidung darüber möglich sein, ob innerhalb der letzteren durch besondere Vereinigungen die Zahl der Molekeln, resp. der Molekelcomplexe vermehrt oder vermindert wird. In dieser Fragestellung wurden Versuche noch nicht mit ausreichender Genauigkeit und Umsicht angestellt, doch scheinen nach Experimenten von de Vries[3]) in den von diesem benutzten Pflanzen die osmotischen Drucke im lebenden Organismus der Summe der Leistung der isolirten Bestandtheile zu entsprechen. Solche Versuche, in denen bei der Auspressung der Säfte zuvor räumlich getrennte Stoffe gemischt werden, können naturgemäss nur angenäherte Werthe geben und ausserdem ist in der aufgeworfenen Frage eine Verallgemeinerung einiger Erfahrungen nicht zulässig. Im Allgemeinen ist aus der erfahrungsgemäss recht verschiedenen Zusammensetzung der Säfte zu folgern, dass die hauptsächlichste osmotische Leistung nicht immer von denselben Stoffen erzielt wird[4]). Dieses

1) Über Colloide vgl. auch van Bemmelen, Beibl. z. d. Annal. d. Physik u. Chemie 1889, Bd. 13, p. 63; Paternò, Zeitschrift f. physikal. Chemie 1889, Bd. IV, p. 456.

2) Da nur gelöste Körper osmotisch wirken, so ist für die Leistungen eines Körpers in der Pflanze nicht schlechthin der Anfangs- und Endzustand, wie in der Verbrennung, massgebend. Vgl. Pfeffer, Physiologie Bd. II, p. 2.

3) l. c., p. 563.

4) Vgl. Pfeffer, Physiologie I, p. 55. — Die historische Angabe von de Vries (l. c., p. 538), dass allgemein der Glycose der Hauptantheil an der Turgorwirkung eingeräumt worden sei, ist demgemäss unrichtig.

Digitized by Google

geht auch im näheren aus den Versuchen von de Vries (l. c.) hervor, welche unter geschickter Verwerthung der ermittelten isotonischen Coefficienten ausgeführt wurden.

Kannte auch schon Dutrochet[1]) Dehnungen in Geweben durch osmotische Leistungen und deren Aufhebung durch Salzlösungen, so war doch eine bestimmte Einsicht in die bezügliche Zellmechanik erst nach näherer Kenntniss des Protoplasmakörpers und des Aufbaus der Zelle überhaupt möglich. Als diese Erkenntniss angebahnt war, entwickelte Nägeli[2]) in ausgezeichneter Weise die ersten Fundamente für das Verständniss der diosmotischen und osmotischen Vorgänge in der lebenden Zelle. Nachdem hiervon mit Rücksicht auf die Diosmose schon früher (p. 242) die Rede war, sollen hier auch bezüglich der osmotischen Leistungen einige historische Bemerkungen folgen, da die bahnbrechende Arbeit Nägeli's sich keineswegs gebührender und historisch correcter Würdigung erfreut.

In vollster Klarheit erkannte Nägeli (p. 21 ff.), dass der zähflüssige Protoplasmakörper für die osmotische Leistung massgebend ist und durch diese der Protoplast gegen die Zellhaut gepresst wird. Indem Nägeli weiter darthat, dass die Zellhaut zur Erreichung des Gegendruckes eine entsprechende Dehnung[3]) erfährt und durch die Spannung an Straffheit gewinnt, entwickelte er damit die Grundzüge des Turgors (vgl. 297). Bemerkt ist vorhin (p. 313) schon, dass Nägeli die plasmolytischen Vorgänge und die darnach zu bemessenden osmotischen und isosmotischen Verhältnisse im Princip richtig darlegte. Mit Bezug auf diese Fundamente hat es keine Bedeutung, dass Nägeli den osmotischen Druck anscheinend zu gering schätzte und als Regel einen gegenseitigen Austausch von Salz und Wasser anzunehmen scheint, obgleich er thatsächlich als Erster für gewisse Inhaltsstoffe die Unfähigkeit zu diosmiren sicher nachgewiesen hatte. Denn an dem Wesen der Sache wird damit eben so wenig geändert, wie mit dem nachträglichen Nachweis, dass der vielfach zu plasmolytischen Bestimmungen benutzte Kalisalpeter doch in etwas diosmirt und eben so wenig hat die Behandlung des Protoplasten als Ganzes für die allgemeine Fundamentirung Bedeutung.

Offenbar haben die unrichtigen und unklaren Vorstellungen Hof-

---

1) Memoires d. végetaux et des animaux, Brüsseler Ausgabe 1837, p. 228; vgl. ausserdem ibid. p. 13 ff.

2) Pflanzenphysiol. Untersuchungen 1855, I, p. 1—35.

3) Auch die specifisch ungleiche Elasticität und Dehnbarkeit wurde richtig beurtheilt und u. a. auch bemerkt (p. 24): »Im Allgemeinen lässt sich vielleicht sagen, dass die Dehnbarkeit der Membran in geradem Verhältniss zu ihrer Jugend und im umgekehrten Verhältniss zur Dicke steht.« — Vgl. dazu die nicht correcten historischen Bemerkungen bei de Vries, Unters. über die mechanischen Ursachen der Zellstreckung 1877, p. 41.

Digitized by Google

meister's[1]) über die Imbibition der Zellwände als Ursache der Spannungen und verschiedener vitaler Bewegungsvorgänge vielfach hemmend gewirkt und auch, trotz der Kraftmessungen in Dehnungsversuchen, die frühzeitigere Erkennung der sehr hohen osmotischen Druckkräfte in der Zelle verhindert. Dagegen trugen Nägeli und Schwendener[2]) durch präcise und klare Auseinandersetzungen sehr zur Klärung der hier in Betracht kommenden fundamentalen Fragen bei, ebenso auch Sachs[3]), der, ohne gerade für das Wesen der osmotischen Spannung neues zu liefern, den Turgor in seiner Bedeutung, insbesondere für das Wachsen hervorhob und damit den Anstoss für verschiedene sich anschliessende Untersuchungen gab.

In Untersuchungen über Bewegungsvorgänge erkannte ich[4]) dann, dass durch rein osmotische Leistungen, also unabhängig von irgend einer Imbibitionsänderung der Zellwand, in den Zellen unerwartet hohe Drucke zu stande kommen. Dieses gab mir, wie schon (p. 299) bemerkt wurde, Veranlassung, das damit aufgeworfene physikalische Problem aufzuhellen und im Verein hiermit das osmotische System und die damit verknüpften Verhältnisse in der Zelle zu präcisiren. Überhaupt war es in den Osmotischen Untersuchungen (1877) mein Streben, die fundamentalen Fragen bezüglich der osmotischen Druckzustände zu klären und so den Boden für diejenigen ferneren Studien zu ebnen, welche mit diesen Factoren zu rechnen haben. Die damals entwickelten allgemeinen Erwägungen bestehen auch heute noch zu vollem Rechte, abgesehen von der physikalisch unrichtigen und erst in dieser Abhandlung richtig gestellten Voraussetzung, nach welcher, ohne Diosmose, der Qualität der abschliessenden Haut ein Einfluss auf den osmotischen Druck zugestanden wurde.

Gleichzeitig mit den Osmotischen Untersuchungen erschien eine Untersuchung von de Vries[5]), in welcher in Anlehnung an die von Sachs ausgesprochene Bedeutung des Turgors für das Wachsen, die durch osmotische Spannung erzielte Dehnungsgrösse in den verschiedenen Wachsthumszonen

---

1) Vgl. die Zusammenfassungen in Hofmeister, Pflanzenzelle 1867, p. 267 ff.

2) Mikroskop, I. Aufl., 1867, p. 376, 410 u. s. w.

3) Lehrbuch d. Botanik 1868, I. Aufl., p. 510; 1873, III. Aufl., p. 699.

4) Physiologische Untersuchungen 1873, p. 119 ff. Periodische Bewegungen 1875, p. 111. — Wie der unerwartet hohe osmotische Druck Veranlassung gab in Erwägung zu ziehen, ob nicht die Messungsmethode zu hohe Werthe liefere, ist aus Osmot. Untersuchungen 179, Anmerkung zu ersehen.

5) Untersuchungen über die mechanischen Ursachen d. Zellstreckung 1877. Die Einwirkung von Salzlösungen zur Aufhebung der osmotischen Dehnungen in Geweben wurde zuerst von Dutrochet benutzt (vgl. Pfeffer, Physiologie, Bd. II, p. 20). Von der ferneren physiologischen näheren Aufklärung durch Nägeli war vorher die Rede.

Digitized by Google

ermittelt wurde. Dabei wurde zugleich die Existenz hoher osmotischer Spannungen bestätigt (l. c., p. 118). Späterhin wurde dann von de Vries[1]) an lebenden Zellen die relativ osmotische Leistung verschiedener Stoffe näher bestimmt und aus den Erfahrungen, wie schon mitgetheilt (p. 311), die wichtige Beziehung der relativen osmotischen Leistung zu dem Molekulargewicht abgeleitet. Im Anschluss fand auch auf Grund früherer Erfahrungen die absolute osmotische Druckleistung für gegebene Stoffmengen die schon (p. 306) besprochene angenäherte physikalische Bestimmung.

Die Physiologie hat zunächst mit den Thatsachen zu rechnen und kann die Ausbildung der theoretischen Seite des osmotischen Druckes in dem allgemein (p. 301) gekennzeichneten Sinne der physikalisch-chemischen Forschung überlassen. Jedenfalls ist aber für die fernere Entwicklung aller den osmotischen Druck betreffenden Fragen von der allerhöchsten Bedeutung die Theorie van't Hoff's[2]), nach welcher, wie bemerkt, die gelösten Molekeln in ihrem Lösungsmedium sich wie die Gasmolekeln im Raume bewegen und wie diese kinetisch den osmotischen Druck erzeugen, der demgemäss ebenfalls dem Boyle-Mariotte'schen Gesetz, so wie der Hypothese Avogadro's zu folgen hat.

In jedem Falle bedarf es aber eines Lösungsmediums, um osmotische Leistung zu ermöglichen und in einer Zelle kann der osmotische Druck nur durch entsprechenden Eintritt von Wasser (oder eines anderen Lösungsmediums) als Spannung zur Geltung kommen. Es besteht übrigens ein analoges Verhältniss, wenn man sich etwa Stickstoff in ein Gefäss eingeschlossen denkt, dessen Wandung dieses Gas nicht durchlässt, wohl aber umgebenden Wasserstoff, der somit bis zur Herstellung beiderseitigen Gleichgewichts eindringt. Als einen Gleichgewichtszustand zwischen Einstrom und Ausstrom der durchlässigen Flüssigkeit kann man also in mechanischer Hinsicht bei jeder Hypothese den osmotischen Druck betrachten und in die Rechnung einführen. Als Ursache des Eintriebs des Wassers hat auch schon Fick[3]) allein die molekularen Bewegungen der Wassertheile vermuthungsweise angesprochen, aber natürlich mit solcher Abstraction von anziehenden Wirkungen der Salztheile noch nicht den osmotischen Druck als eine rein kinetische Leistung der gelösten Molekeln erklärt.

Wenn diese Hypothese van't Hoff's auch fernerhin mit den Thatsachen vereinbar bleibt, wird sie jedenfalls am einfachsten und durchsichtigsten die Verhältnisse des osmotischen Druckes übersehen lassen. Diese kinetische

1) Jahrb. f. wiss. Botanik 1884, Bd. 14, p. 427. — Über Genesis und Bedeutung der Plasmahäute vgl. diese Abhandlung p. 244.

2) Zeitschrift f. physikal. Chemie, 1887, Bd. I, p. 481; Ostwald, Grundriss d. allgem. Chemie 1889, p. 129.

3) Medicinische Physik 1885, III. Aufl., p. 36. Auch schon ebenda 1866, II. Aufl., p. 36.

Digitized by Google

Theorie lässt natürlicherweise, ebenso wie bei Gasen, einen veränderten Zustand der Zusammensetzung und der Beweglichkeit an der Contactfläche mit der Haut zu und ebenso die Mitwirkung der von der Haut ausgehenden Molekularkräfte bei Einleitung und Abspielung der diosmotischen Bewegung[1]. Als nothwendig kann freilich die kinetische Theorie zur Zeit nicht gefordert werden, denn bei aller Übereinstimmung gewisser Grössen mit der kinetischen Hypothese können doch immer noch Gasdruck und osmotischer Druck ihrem Ursprung nach verschieden sein[2]. Dieses ist ebenso bezüglich Gefrierpunktserniedrigung, Dampfspannung, elektrischer Leitfähigkeit und anderer Werthe zu beachten, deren mit dem osmotischen Druck gleichwerthige Relationen alle diese Eigenschaften als Äusserungen der allgemein in einer Lösung gebotenen Verhältnisse erscheinen lassen. Die übereinstimmende Beziehung zum Molekulargewicht lässt aber die Abweichungen[3] bei jeder Theorie kaum anders als durch eine Verminderung oder Vermehrung der in Lösung befindlichen Molekeln durch irgend eine Dissociation oder Association erklärlich erscheinen. Zweifel kann aber wohl nie darüber sein, dass Diffusionsbewegung und osmotischer Druck aus gleichen Ursachen entspringen, und die mangelnde Proportionalität zwischen den Constanten beider ist unter den in Lösung gebotenen Verhältnissen verständlich, gleichviel welche bewegenden Kräfte im Spiele sind[4].

---

1) Der Einfluss solcher Molekularkräfte auf Diosmose und die Constitution der Lösung an der Contactfläche mit der Haut ist seiner Zeit (Osmot. Untersuchungen p. 32) im Anschluss an bestehende Anschauungen mit dem ausdrücklichen Bemerken behandelt, dass es für die osmotischen Thatsachen ohne Bedeutung ist, wie man sich z. B. die abschliessende Haut im näheren aufgebaut denkt. Wäre mir nicht erst nach Abschluss der eben genannten Abhandlung die Nägeli'sche Bezeichnung Micell bekannt geworden (vgl. l. c., p. 150, Anmerkung), so würde ich auch nicht als synonym mit Molekülverbindung das Wort Tagma gewählt haben, wenn dieses auch einen weiteren Sinn hat, als Micell, womit nur eine besondere Art von Molekülverbindung gemeint ist (vgl. Pfeffer, Physiologie I, p. 13).

2) Vgl. Pupin, der osmotische Druck und seine Beziehung zur freien Energie 1889, z. B. p. 41; Bredig, Zeitschrift f. physikal. Chemie 1889, Bd. IV, p. 444; Lothar Meyer, Zeitschrift f. physikal. Chemie 1890, Bd. 5, p. 23. van't Hoff, ebenda, p. 174. Wie immer übrigens die theoretische Erklärung ausfallen mag, so ist doch kein Grund die Bezeichnung »osmotischer Druck« fallen zu lassen.

3) Nach Entwickelungen von Noyes (Zeitschrift f. physikal. Chemie 1890, Bd. V, p. 53) dürften die Abweichungen des osmotischen Druckes von den Gasgesetzen nicht erheblich sein.

4) Vgl. die p. 311 citirten Arbeiten.

Digitized by Google

IX. Blicke auf Druckwirkungen als Ursache einiger Bewegungen.

Mit dem Vorhandensein gelöster Stoffe ist unbedingt auch eine entsprechende osmotische Leistung in der Zelle gegeben, welche, sofern sie nicht durch eine isosmotische Gegenwirkung im Aussenmedium äquilibrirt wird, als osmotischer Druck zur Geltung kommt. Demgemäss bedingt die Existenz gelöster Stoffe eine gewisse osmotische Leistung, welche freilich in Primordialzellen, bei der geringen Cohäsion des Protoplasmas, nur geringe Werthe erreichen kann. In den Vacuolen der Primordialzellen ist aber der osmotische Druck eine Bedingung für die Existenz (p. 295), während in dem Protoplasma selbst, auch in dem hautumkleideter Zellen, das Vorhandensein gelöster Stoffe und damit osmotische Leistung nach unsern heutigen Kenntnissen nicht als absolut nothwendig gefordert werden kann. Jedenfalls ist aber eine erhebliche osmotische Spannung keine so allgemein unerlässliche Bedingung für die Functionstüchtigkeit und Erhaltung der Organismen, wie der für die Ernährung unentbehrliche diosmotische Austausch, und ein osmotischer Druck, welchem die Gegenwirkungen des Protoplasmas nicht mehr gewachsen sind, fehlt in Primordialzellen und überhaupt in Zellen, deren Protoplast einer fremden Widerlage nicht angepresst ist. In den hautumkleideten Zellen pflegt aber bekanntlich normalerweise ein hoher osmotischer Druck zu bestehen, welchem die gespannte Zellhaut entsprechenden Gegendruck zu leisten hat. Wo aber solcher Turgor vorhanden, ist dieser gewöhnlich ein wesentlicher Factor, welcher für die Realisirung oder für das richtige Ausmaass einzelner der normalen Functionen mehr oder weniger und öfters entscheidend in Betracht kommt. Dieserhalb kann der Turgor für die Fortdauer der Zelle ganz unentbehrlich sein, wenn auch zunächst mit Aufhebung des Turgors noch verschiedene Thätigkeiten des Organismus fortdauern.

Um allgemein und im concreten Falle die Bedeutung der osmotischen Leistungen nach Entstehung, Änderung, Leistung u. s. w. sachgemäss studiren und würdigen zu können, ist natürlich und vor allen Dingen die allgemeine Kenntniss des Wesens der Sache noth-

Digitized by Google

wendig. Dieses Ziel war es, das ich sowohl bezüglich der physikalischen Fundamente, als auch mit Rücksicht auf die in der Zelle bestehenden Verhältnisse in den Osmotischen Untersuchungen, und ergänzend in dieser Abhandlung, in erster Linie im Auge hatte. Sobald es sich aber um causale Erklärung bestimmter vitaler Vorgänge handelt, ist unter allen Umständen die Berücksichtigung der gesammten bewirkenden Ursachen geboten, da im Allgemeinen der Turgor immer nur einer der mitspielenden Factoren ist. Dieserhalb ist aber auch einem Studium der vitalen Erscheinungen als solcher, mit Rücksicht auf das gesammte Causalverhältniss, einer monographischen Behandlung des Turgors, in seiner Bedeutung für die verschiedenen vitalen Vorgänge, bei der heutigen Sachlage der Vorzug zu geben, da solche specielle Bezugnahme auf einen Factor erfahrungsgemäss nur allzuleicht zu einer einseitigen Überschätzung dieses und damit gar oft zu unzutreffenden Deutungen der thatsächlichen Vorgänge führt.

Bei aller Bedeutung der Wechselwirkung der Organe und der einzelnen Bausteine in Geweben führt doch die causale Aufhellung schliesslich auf Vorgänge in der einzelnen Zelle und mit Bezug auf diese sind auch zunächst die fundamentalen Verhältnisse des Turgors zu behandeln. In der Zelle ist wiederum das mit der räumlichen Trennung geschaffene osmotische System in schon besprochener Weise und des weiteren zunächst die Qualität und Quantität der gelösten Stoffe nach osmotischer Leistung und ihrer Herkunft zu beachten. Dem bestimmten Stoffe kommt natürlich stets dieselbe osmotische Leistungsfähigkeit zu, gleichviel ob er durch Stoffmetamorphosen in der Zelle entstand oder von aussen kam und auf irgend eine Weise in der Zelle gespeichert wurde.

Im Allgemeinen ist tieferer oder leichterer Stoffumsatz für Erzielung und Regulation des Turgors nothwendig und falls auch durch mechanische Arbeit des Protoplasten gelöste Körper unverändert ins Innere geführt und gespeichert werden sollten (p. 283), ist offenbar die hierzu nöthige Arbeitskraft durch die Athmung oder durch andere entsprechende chemische Umsetzungen zu liefern. Entstammt nun auch die osmotische Leistung nicht direct chemischen Processen, so sind diese doch zur Herbeischaffung der bewirkenden gelösten Körper und auch zur Erzeugung des in der Zelle gebotenen osmotischen

Digitized by Google

Apparates nothwendig und insofern hängt alle osmotische Leistung von chemischer Energie ab, welche in der Technik wie in dem Naturhaushalt ausgedehnt in Betracht kommt und auch in dem Organismus nothwendige Betriebskraft liefern muss. Dabei kann aber der grösste Theil der Arbeitskraft der Pflanze, wie es thatsächlich und speciell mit Rücksicht auf Wachsthum und äussere Arbeit zuzutreffen scheint, zunächst aus osmotischen Leistungen hervorgehen. Mit Rücksicht auf diese von der Qualität und der Löslichkeit abhängige Energieentwickelung ist aber sofort klar, dass nicht schlechthin die Verbrennungswärme und die alleinige Beachtung von Anfangs- und Endzustand ein richtiges Maass für die Leistungsfähigkeit eines Stoffes im Organismus geben kann[1]. Übrigens ist wiederum die kinetische Theorie des osmotischen Druckes am besten geeignet, um die angedeuteten Verhältnisse am einfachsten übersehen zu können.

Mit dem Zustandekommen osmotischer Leistungen sind auch die Bedingungen gekennzeichnet, unter denen sich jene ändern können und ändern müssen. Wie der Eintritt oder die Production eines Körpers eine Erhöhung, muss jede Entfernung eines Stoffes eine Senkung des Turgordrucks zur Folge haben, und wenn diese Entfernung durch Exosmose geschieht, wird dieser Körper, sofern er in der Zellhaut verbleibt, wie jeder in dieser imbibirte Körper, eine der isosmotischen Wirkung entsprechende Verminderung des Turgors erzielen. Auch jede Stoffumwandlung, welche weniger wirksame Stoffe schafft, hat unvermeidlich Herabdrückung des Turgors zur Folge, mag es sich nun um Entstehung unlöslicher Körper oder um Formirung weniger wirksamer Stoffe, resp. weniger zahlreicher Molekeln oder Molekelaggregate handeln. Mit grosser Schnelligkeit solchen Wechsels wird aber auch eine schnelle Turgorschwankung erzielbar.

Bei der Aufhellung solcher Vorgänge ist natürlich auch im näheren der Ort im osmotischen System zu bestimmen, an welchem sich der Wechsel vollzieht. Kommt aber für irgend einen Vorgang nur die durch den Turgor erzielte mechanische Leistung in Betracht, so ist es für die nächste mechanische Einsicht selbstverständlich ausreichend, wenn diese Turgorkraft nach Intensität und zeitlichem Wechsel bestimmt ist.

---

1) Vgl. Pfeffer, Physiologie Bd. II, p. 1; Zur Kenntniss d. Oxydationsvorgänge 1889, p. 112.

Digitized by Google

Erhaltung und Wiederherstellung des Turgors in allem Wechsel fordern aber nothwendig eine zweckentsprechende Selbstregulation. Nur so ist es z. B. möglich, dass in wachsenden Zellen, auch wenn diese (und ihre Descendenten) das 10fache Volumen erreichen, dennoch sich annähernd derselbe Turgor erhält und zwar ebensowohl wenn das Wachsthum, und mit ihm die entsprechenden Reactionen, sich langsam oder schnell abspielen. Analoges gilt für die Accommodation von Schimmelpilzen (und ebenso anderer Pflanzen) an gesteigerte Concentration der umgebenden Lösung, eine Accommodation, welche auch bei Nichtaufnahme des gelösten Stoffes, durch entsprechende Production osmotisch wirksamer Körper im Innern der lebenden Zelle erreicht wird[1]). Ferner zählt z. B. hierher die schnell verlaufende Wiederherstellung des Turgors nach rapider Reizsenkung bei Mimosa, Staubfäden der Cynareen u. s. w.[2]). Bei solchem schnellen Verlaufe tritt die zur Ausgleichung und zur Wiederherstellung des früheren Gleichgewichts führende Gegenreaction besonders auffällig hervor. Doch beruht überhaupt das Wesen der für den Organismus so unentbehrlichen und allgemein thätigen Selbstregulation — mag es sich um Stoffwechsel oder Kraftwechsel handeln — auf Erweckung compensirender Processe in Abhängigkeit von den betreffenden Vorgängen, mögen nun diese auf die eigene Zelle oder auf weit entfernte Organe rückwirken[3]).

Der nähere Zusammenhang der Selbstregulation des Turgors bleibt freilich noch zu ermitteln. Es gilt dieses schon hinsichtlich der zur mechanischen Ausführung nothwendigen Herbeischaffung osmotisch wirksamer Stoffe, mögen diese nun in näher zu bestimmenden Metamorphosen oder durch Aufnahme von aussen gewonnen werden. Zur Erzielung solcher Regulation bedarf es aber weiter

---

1) Eschenhagen, Über den Einfluss verschiedener Concentration auf das Wachsthum von Schimmelpilzen 1889.

2) Pfeffer, Osmot. Untersuchungen 1877, p. 186, 192; Physiolog. Untersuchungen 1873, p. 142.

3) Vgl. Pfeffer, Zur Kenntniss der Oxydationsvorgänge 1889, p. 91. — Hering (Centralblatt f. Physiologie 1889, p. 464) stellt solche Reactionen und Gegenreactionen (die man auch als Destruction und Restruction bezeichnen kann) als Assimilation und Dissimilation gegenüber. Gaskell verwandte die Bezeichnungen Anabolismus und Catabolismus.

Digitized by Google

eines Anstosses, der in den mit dem osmotischen Druck zusammenhängenden Umständen gegeben sein muss, ohne dass sich bis dahin sagen liesse, ob in dem Mangel resp. dem Überschuss der gelösten Stoffe oder in dem Druck die innere Reizursache zu suchen ist. Wenn auch der in Zellen herrschende hydrostatische Druck vielleicht direct keinen sehr erheblichen Einfluss auf die Stoffwechselprocesse hat[1]), so ist doch z. B. für Mimosa pudica, Ranken u. s. w. bekannt, dass eine geringe von aussen kommende Druckwirkung als Reiz wirken kann.

Auf diesem Gebiete eröffnet sich ein weites Feld für künftige Forschung, welche sicherlich die verschiedensten Combinationen aufdecken wird, in denen auch der gegenseitigen Beeinflussung von Zellen und Organen eine Rolle zufällt. Allgemein gehört hierher die Regulation bei Umsatz und Anhäufung von Stoffen, mag dabei specifische Qualität oder Quantität der Stoffe entscheiden. Mit Rücksicht auf diese Verhältnisse ist z. B. auch die Anhäufung von Reservestoffen noch nicht Gegenstand des Studiums gewesen, doch ist einleuchtend, dass u. a. schon durch die Umwandlung von Glycose in den nur halb so wirksamen Rohrzucker oder in das noch weniger leistende Inulin, die Entwicklung eines zu hohen osmotischen Druckes vermieden werden kann. In solchem Sinne ist wohl die so häufige Entstehung von unlöslichen Stoffen, z. B. von Stärke und Öl zu verstehen und vielleicht ist auch die Stärkebildung in den organische Substanz producirenden Chlorophyllkörnern auf die Vermeidung einer zu weit gehenden Anhäufung gelöster Stoffe berechnet[2]). Natürlich müssen in allen diesen Fällen die anderweitigen Beziehungen und Wechselwirkungen gleichmässig berücksichtigt werden, so u. a. auch die Massenwirkungen und die durch diese erreichbaren Fortführungen der an sich nur partiellen Reactionen[3]).

Wie alle Turgorleistungen fallen unter die entwickelten allgemeinen Gesichtspunkte auch die plötzlich verlaufenden Druckschwankungen in manchen Reizbewegungen, in denen die mit dem Wachsthum verbundenen Complicationen ausgeschlossen sind, indem nur

---

1) Vgl. Pfeffer, Osmotische Untersuchungen 1877, p. 167.

2) Vgl. Pfeffer, Physiologie I, p. 194.

3) Vgl. Pfeffer, Zur Kenntniss d. Oxydationsvorgänge 1889, p. 90 und die dort citirte Literatur.

Digitized by Google

elastische Dehnungen der Zellwände in den Dimensionsänderungen mitspielen. Hierzu gehören die auf mechanische Reize erfolgenden bekannten Reizbewegungen der Mimosa pudica und der Staubfäden der Cynareen. Wenn ich nun, im Anschluss an die behandelten fundamentalen Verhältnisse, auf das Wesen der Zellmechanik dieser Reizbewegungen kurz eingehe, so geschieht es, weil einschlägige Arbeiten eine mangelhafte Einsicht in die obwaltenden Umstände verrathen und theilweise sogar in directen Wiederspruch mit physiologischen und physikalischen Thatsachen treten.

Mit Verweisung auf die Behandlung dieses Gegenstandes in meiner Physiologie[1]) beschränke ich mich hier auf die Staubfäden der Cynareen, in welchen die Zellmechanik am klarsten zu controliren und auch am besten erforscht ist. Da ich allein die mechanische Ausführung der Bewegung im Auge habe, kann die Frage bezüglich des Ortes und der Art der Perception des Reizes unerörtert bleiben. Ist auch wohl zweifellos der Protoplasmakörper der sensible Theil, so muss doch dieserhalb nicht in ihm die unmittelbar die Bewegung erzeugende Reaction verlaufen. Es scheint aber nothwendig, dieses nachdrücklich betonen zu müssen, da in dieser Hinsicht in der Pflanzenphysiologie häufig genug Verwechselungen unterlaufen. Thatsächlich ist aber Übertragung und Fortpflanzung von Reizen eine ganz allgemeine Nothwendigkeit und für Diejenigen, welchen solches nicht geläufig ist, mag daran erinnert werden, dass z. B. bei Drosera das Drüsenköpfchen gegen Berührung, bei der Wurzel die Spitze gegen hydrotropische Wirkung empfindlich ist, während entfernt von den sensiblen Organen als ausgelöste mechanische Action eine Krümmung erfolgt[2]).

Rein empirisch wurde in früheren Untersuchungen[3]) für die einzelnen Zellen in den Staubfäden der Cynareen Folgendes festgestellt. Durch einen Reiz wird der vom Inhalt gegen die Zellwand ausgeübte Druck (also die Turgorkraft[4]) plötzlich herabgesetzt und

1) Pfeffer, Physiologie Bd. II, p. 234.

2) Vgl. u. a. Pfeffer, Arbeit d. botan. Instituts zu Tübingen 1885, Bd. I, p. 527.

3) Physiologische Untersuchungen 1873, p. 80 ff. und Pflanzenphysiologie l. c.

4) Gemäss der auf p. 297 gegebenen Definition wird unter Turgorkraft der Gesammtdruck des Inhalts gegen die Zellwand, ohne Rücksicht auf den Ursprung, verstanden.

Digitized by Google

unter dem Druck der gespannten Zellhaut, welche ihre elastischen Eigenschaften unverändert bewahrt, filtrirt so lange Wasser aus der Zelle, bis wiederum Gleichgewicht zwischen Turgorkraft und Zellhautspannung hergestellt ist. Immer tritt nur partielle Senkung der Turgorkraft ein und dieserhalb bleibt der Protoplast der Zellwand auch dann angepresst, wenn durch Festklemmen des Staubfadens die Verkürzung verhindert wird. Auch tritt, dem Gesagten entsprechend, unter diesen Umständen kein Wasser aus der gereizten Zelle. Die ansehnliche Verkürzung und Volumabnahme der Zelle wird durch die innerhalb der Elasticitätsgrenze auffällig hohe Dehnbarkeit der Zellwandungen in diesen Staubfäden ermöglicht. Denn bei minimaler Dehnung wird partielle oder totale Aufhebung des Turgors natürlich keine auffällige Dimensionsänderung der Zelle erzielen, wie z. B. bekannte Erfahrungen an Spirogyra u. s. w. lehren[1]). Die ziemlich ansehnliche Menge des austretenden Wassers (sie kann über 20 % des Volumens einer Zelle betragen) gelangt in die Intercellularräume, in denen sie entsprechend Luft verdrängt[2]). Demgemäss tritt erst nach Injection der Intercellularräume mit Wasser aus der Schnittfläche eines gereizten Staubfadens wässrige Flüssigkeit hervor.

Bestimmungen der Energie, mit welcher die Verkürzung angestrebt wird, ergaben, dass die Turgorkraft bei einer Reizung sicher um mehr als 1 Atmosphäre, wahrscheinlich bis zu 3 Atmosphären abnimmt[3]). Wie dieses Kraftmaass ist auch von Bedeutung, dass sogleich nach der schnellen Reizverkürzung die langsamer verlaufende Wiederherstellung des früheren Turgors beginnt, der auch dann

1) Vgl. Pfeffer, 1873, l. c., p. 139.

2) In den Staubfäden von Berberis fand ich in früheren Untersuchungen (Physiol. Untersuchungen p. 127, 158) in Übereinstimmung mit Unger keine Intercellularräume. Offenbar bildet aber das damals untersuchte Object einen Ausnahmefall, da ich in den fernerhin geprüften Staubfäden als Regel Intercellularräume beobachtete.

3) Die gefundenen Werthe (Physiol. Untersuchungen p. 121) erschienen seiner Zeit so hoch, dass nach thunlichster Reduction gesucht wurde. Thatsächlich dürften aber diese Reductionsfactoren kaum ins Gewicht fallen (vgl. Osmot. Untersuchungen p. 179) und dann würde die Turgorsenkung ungefähr 3 Atmosphären betragen. Für die Gelenke von Mimosa ergab sich eine Turgorsenkung von 2,3 bis 5 Atmosphären (Pfeffer, Periodische Bewegungen p. 112).

Digitized by Google

erreicht wird, wenn die Reizbarkeit durch Chloroformiren oder Entziehung von Sauerstoff eliminirt ist. Da solches ebenso in den aus Filamenten entnommenen Schnitten geschieht, so kann in diesen natürlich durch die plasmolytische Methode eine Senkung des Turgors nicht constatirt werden[1]).

Obgleich in meinen Untersuchungen zwischen Thatsachen und hypothetischen Folgerungen streng unterschieden wurde, ist eine solche Unterscheidung in der Benutzung dieser Arbeiten durch andere Forscher meist nicht aufrecht gehalten worden. Auf Auseinanderhalten von Thatsache und Hypothese ist aber um so mehr Werth zu legen, als auch heute noch die nähere Feststellung der inneren Ursachen aussteht, welche durch Depression der Turgorkraft zur Reizcontraction führen. Diese müssen sich aber innerhalb des empirischen Rahmens halten und wenn schliesslich alle physiologische Erkenntniss nur auf Einengung hinausläuft, so war eine solche in unserem Falle um so nothwendiger, als zuvor nicht einmal der Antagonismus zwischen elastischer Zellwand und Turgorkraft erkannt und die damals herrschende Meinung sogar eher geneigt war, die Contractionsursache in eine Veränderung der Zellhaut zu legen[2]).

Der gekennzeichnete Rahmen ist aber zunächst mit jeder Druckänderung vereinbar. Denn wie die Schnelligkeit der Filtration durch Fliesspapier oder Thierblase nur von der treibenden Kraft, ganz unabhängig von Qualität und Ursprung dieser, abhängt, kann man auch dem schnellen Wasseraustritt aus den Zellen der Cynareenstaubfäden nicht ansehen, woher die nöthige Betriebskraft stammt. Plötzlich muss diese ja unter allen Umständen sich geltend machen und dass die Zellen, was ebenfalls nothwendig ist, die genügend schnelle Filtration unter den gegebenen Verhältnissen gestatten, wurde seiner Zeit auf verschiedenem Wege empirisch dargethan.

Der Wasseraustritt sagt also nur, dass der Druck des Zellinhalts gegen die Zellwand sich verändert und demgemäss so lange Wasser nach aussen filtrirt, als die mit der Verlängerung abnehmende Spannung der Zellhaut überwiegt. Die Depression der Turgorkraft könnte

---

1) Vgl. Pfeffer, Physiologie II, p. 240; Hilburg, Unters. a. d. botan. Institut zu Tübingen 1881, Bd. I, p. 23.

2) Historisches vgl. Physiol. Untersuchungen 1873, p. 128, 142.

Digitized by Google

aber ebensowohl durch eine active Contraction des Protoplasmakörpers, als durch Senkung des osmotischen Druckes erzielt werden. Eine solche Senkung wäre wiederum mit gleichem Contractionserfolge möglich durch Umbildung gelöster Stoffe in osmotisch weniger leistende Körper, durch Exosmose gelöster Substanz oder, ohne Austritt, durch Auftreten plasmolytisch wirkender Körper in der Zellhaut[1]. Auch eine gesteigerte Pressung von aussen würde Gleiches erreichen und nur empirisch konnte und musste festgestellt werden, dass die Reizcontraction nicht etwa durch einen plötzlich gesteigerten Druck von Seiten der Zellwand erfolgt[2]. Nur mangelnde Einsicht in diese einfachen physikalischen Forderungen konnte zu dem Versuche führen, aus der Schnelligkeit der Reaction auf einen bestimmten Modus der Druckschwankung zu schliessen. Auch ist eine genügend schnelle Reaction ebensowohl im Protoplasma, als im Zellsaft oder selbst in der Zellhaut denkbar, da schnelle Reizübermittlung möglich und bekannt ist[3].

Aus dem Vorhandensein eines hohen osmotischen Druckes kann natürlich nicht schlechthin gefordert werden, dass jener auch die zur Reizbewegung nöthige Herabdrückung der Turgorkraft besorgt, und alle Eigenschaften, welche nur von der Turgorhöhe abhängen, wie Biegungsfestigkeit u. s. w., vermögen selbstverständlich über die näheren Ursachen der Reizreaction nichts auszusagen. Nochmals sei auch hervorgehoben, dass, so lange Exosmose gelöster Stoffe nicht eingeleitet wird, weder eine gesteigerte Filtrationsfähigkeit, noch eine Qualitätsänderung der Plasmahaut eine Veränderung der osmotischen Leistung ergeben kann[4].

---

1) Dass gelöste Stoffe in der Zellhaut durch Quellungsänderung keine in Betracht kommende Verkürzung der Zellwand erzielen, wurde in Physiol. Untersuchungen p. 130 nachgewiesen.

2) Ich kann hier die aus der Gewebespannung resultirenden Vorgänge ausser Acht lassen, da die Veränderungen in dieser nur aus Turgoränderung in den einzelnen Zellen entspringen und also der Gewebeverband nur Einfluss auf die Bewegungsamplitude der einzelnen Zelle haben kann, die aus den Messungen an dem ganzen Filament abgeleitete Kraft der Contraction aber dem resultirenden Mittelwerth entspricht.

3) Die diesbezüglichen Irrthümer von Vines (Arbeit. d. Würzburger Instituts 1878, Bd. II, p. 146) habe ich schon in meiner Physiologie (Bd. II, p. 241 Anmerkung) dargelegt.

4) Vgl. diese Abhandlung p. 302. Mit der physikalischen Aufklärung des osmotischen Druckes wurde auch der, bei den früheren Anschauungen naheliegende

Ist auch die nächste Ursache der Reizcontraction nicht sicher bekannt, so lässt sich doch so viel sagen, dass die nöthige ansehnliche mechanische Leistung nicht durch active Contraction des Protoplasmas zu stande kommen kann, wie schon mit Rücksicht auf die zu geringe Cohäsion des Protoplasmas in den Physiologischen Untersuchungen[1]) gefolgert wurde und im näheren aus dieser Abhandlung zu entnehmen ist. Jedoch muss ich auch auf diesen Punkt noch ein wenig eingehen, da späterhin Vines[2]) und Gardiner[3]) dem Wesen nach solche active Contraction des Protoplasmas und eine damit gesteigerte Pressung gegen den Zellsaft als Ursache der Reizverkürzung ansprachen, ohne sich übrigens irgendwie mit der nöthigen mechanischen Leistung abzufinden und ohne irgend eine Beobachtung beizubringen, die gegenüber einer sachgemässen Kritik Bedeutung behält.

Wir haben hier nicht nöthig, auf die näheren Vorstellungen der genannten Autoren einzugehen, da in jedem Falle die in der Reizbewegung ausgelöste Energie ein zu erfüllendes mechanisches Maass abgiebt. Wenn also z. B. die Bewegung durch active Contraction des Protoplasmas zu stande kommen soll, so muss dieses den Druck auf den Zellsaft jedenfalls um einige Atmosphären steigern, also umgekehrt auch eine solche Spannung ohne Zerreissen und ohne Verschieben der aufbauenden Theile aushalten können. Eine solche Cohäsion aber traut doch wohl Niemand dem mehr oder weniger zähflüssigen Protoplasma zu. Übrigens strömt während und unmittelbar nach der Reizbewegung das Protoplasma in den

---

Irrthum bezüglich des Einflusses der Filtrationsschnelligkeit auf die osmotische Leistung corrigirt. Führten auch die früheren Erwägungen schon darauf, dass durch anderweitige Qualitätsänderung der Plasmahaut (abgesehen von Exosmose) wenigstens erhebliche Druckänderungen nicht erzielt werden dürften, so wurde doch erst in dieser Abhandlung die Sache endgültig erledigt. (Vgl. Pfeffer, Physiologie Bd. II, p. 241.)

1) Physiolog. Untersuchungen 1873, p. 132; Osmotische Untersuchungen 1877, p. 170.

2) Arbeit. d. Würzburger Instituts 1878, Bd. II, p. 146.

3) Annals of botany 1888/89, Bd. II, p. 366. — Dem Wesen nach ähnliche Annahmen wurden anscheinend schon früher (1866) von Cohn gemacht. Vgl. Pfeffer, Physiol. Untersuchungen p. 83, 142.

Digitized by Google

activen Zellen der Staubfäden von Centaurea ungeschwächt fort[1]) und bekundet somit noch besonders, dass auch nicht etwa vorübergehend ein wesentlich festerer Aggregatzustand angenommen wird.

In den cylindrischen Zellen der Cynareen, in denen also die Verkürzungslinie mit der Längsachse zusammenfällt, haben die Längswandungen, ebenso wie in einem gedehnten Kautschukschlauche, den longitudinalen Zug voll zu tragen und Gleiches gilt für das Protoplasma, welches einen angepressten Cylindermantel bildet. Berechnet sich nun z. B. in einem Staubfaden von Cynarea Scolymus die bei der Reizung ausgelöste Energie, nach dem zur Verhinderung der Contraction gerade nöthigen Gewicht, mit Bezug auf den ganzen Querschnitt, zu 20,6 gr für das Quadratmillimeter (= 2 Atmosphären)[2]), so muss diese Spannung vom Protoplasma erzielt werden, falls dessen Contraction die Verkürzung bedingt. Mit Bezug auf die Flächeneinheit ergiebt sich aber dann für das Protoplasma eine Spannung von 82,4 gr pro Quadratmillimeter (= 8 Atmosphären), wenn das Protoplasma, was wohl eher zu hoch angenommen ist, $^1/_4$ der Querschnittfläche des Staubfadens occupirt.

Wollte man aber der nicht mitströmenden Hautschicht allein diese Action zuertheilen, so müsste die Leistung der Hautschicht im Verhältniss des wirksamen Querschnitts, also wohl um das 5fache (40 Atmosphären) ansehnlicher sein. Wie unmöglich solche Cohäsionskräfte für das Protoplasma sind, mag noch daraus erhellen, dass das relativ feste und nicht mehr strömungsfähige Plasma der Plasmodien bei einer Belastung von 0,3 gr pro Quadratmillimeter sich allmählich plastisch dehnt und zerreisst (p. 262). Mit Protoplasma höherer Cohäsion, wie solches z. B. in Cilien, in der Haut der Flagellaten u. s. w. vorliegt, haben wir im zähflüssigen und strömenden Protoplasma nicht zu rechnen und ebenso können die Leistungen dieses nicht nach solchem festeren Aggregatzustand bemessen werden. Bemerkt mag noch werden, dass nach dem plasmolytischen Verhalten das Protoplasma unserer Zellen im maximalen Turgorzustand (der in Schnitten ja immer erreicht und conservirt wird) die übliche Zähflüssigkeit besitzt. Dass die physikalische Oberflächenspannung an der Grenzfläche des Protoplasmas in diesen cylindrischen Zellen, gegenüber den ausgelösten Kräften, keine ins Gewicht fallende Leistung zu vollführen vermag, bedarf wohl keiner Erörterung (vgl. p. 266).

Die obigen Betrachtungen gelten für jeden beliebigen Modus, in welchem das Protoplasma vermöge elastischer Kräfte, d. h. wie ein fester Körper zu wirken hat, also auch für den Fall, dass umgekehrt bei Reizung ein Nach-

---

1) Ausscheidungen und anderweitige sichtbare Veränderungen finden leider bei dieser Reizcontraction nicht statt. Vgl. Pfeffer, Physiologie Bd. II, p. 242 und die dort citirte Literatur.

2) Vgl. p. 326 Anmerkung.

Digitized by Google

lassen der im labilen Zustand vorhandenen Spannung im Protoplasma angenommen wird. Auch ist leicht einzusehen, dass die Anpressung des Protoplasmas gegen die Zellwand demselben keine höhere elastische Cohäsion zu geben vermag. Von den elastischen Wirkungen ist natürlich die Quellungskraft zu unterscheiden, welche auch bei Verschiebbarkeit der Theile wirken kann, unter diesen Umständen aber, wie früher (p. 293) bemerkt wurde, den durch die osmotische Leistung des Zellsaftes ausgeübten Turgordruck nicht zu steigern vermag.

Obige Schlüsse sind unter den gleichen Voraussetzungen ebenso für kugelige Zellen (auch für Mimosa) bindend, da ohnehin der bei den gebotenen Radien vom zähflüssigen Protoplasma ausgehende Centraldruck nur verhältnissmässig geringe Werthe erreicht (vgl. p. 298).

Mit der Abweisung einer Cohäsionscontraction des Protoplasmas kommen wir also zu dem schon 1873 gezogenen Schlusse, dass eine Schwankung des osmotischen Druckes die nächste mechanische Ursache dieser Reizbewegung sein muss. Wie im näheren diese Variation zu stande kommt, vermag ich auch heute nicht zu entscheiden. Selbst die Frage, ob dabei ein Austritt gelöster Stoffe aus der Zelle im Spiele ist, wurde noch nicht endgiltig erledigt, wenn auch einige Versuche mit Staubfäden der Cynareen eher gegen solchen Austritt sprechen. Werden die Intercellularen des Staubfadens zum grössten Theil mit Wasser injicirt, so tritt bei der nun allerdings verminderten Bewegungsamplitude etwas Flüssigkeit aus der Schnittfläche des Filaments hervor[1]). Liegt aber der Staubfaden dabei in einer relativ ungeheuer grossen bewegten Wassermenge, so müsste nothwendig etwas Stoff entführt werden und doch geht bei wiederholter Reizung der Staubfaden auf die frühere Länge zurück. Warum diese bisherigen Versuche noch nicht völlig beweisend sind, will ich hier nicht näher erörtern und nur daran erinnern, dass selbst bei Wegfuhrung gelöster Körper, dennoch durch entsprechenden Stoffwechsel eine Regulation der Turgorkraft in dem früher besprochenen Sinne denkbar wäre. Müsste auch diese Regeneration sich schnell abspielen, so kann sie doch nicht als unmöglich abgewiesen werden.

Andrerseits liegen Beweise für einen Austritt von Stoffen nicht

---

1) PFEFFER, Osmotische Untersuchungen 1877, p. 190. — Wendet man mit Indigcarmin gefärbtes Wasser zur Injection an, so kann man die ziemlich schnelle Entfernung des Farbstoffs aus isolirten Filamenten verfolgen.

Digitized by Google

vor. Wenn Janse[1]) in diesem Sinne die Existenz von Salzen in dem aus dem gereizten Gelenke von Mimosa pudica hervorschiessenden Flüssigkeitstropfen anführt, so vergisst er, dass schon die im ungereizten Gelenke vorhandene extracellulare Flüssigkeit reichlich Salze enthält[2]). Offenbar verkennt aber Janse u. a. ganz, dass seine Annahme ebenso in den von mir gekennzeichneten Rahmen fällt und es (bei der nur partiellen Aufhebung des Turgors) wiederum der elastischen Spannung der Zellhaut bedarf, um Wasser hervorzupressen. Auch ist ein solcher Modus, der zugleich Austritt gelöster Substanz und eventuell deren Wiederaufnahme fordert, keineswegs einfach, wie Janse meint (l. c., p. 80). Denn thatsächlich wäre es an sich einfacher, wenn die Senkung des Turgors durch irgend einen Übergang gelöster Stoffe in osmotisch weniger wirksame Körper erreicht würde.

Sollte aber der Reizvorgang an den Austritt eines Körpers gebunden sein, so kommt für dessen osmotische Leistung sowohl die Entfernung aus der Zelle als auch die plasmolytische Wirkung ausserhalb der Zelle in Betracht. Eine solche Stoffausgabe könnte aber, ausser durch entsprechende Einleitung von Diosmose, auch durch ein vorübergehendes locales Einreissen der Plasmahäute erreicht werden. Ein derartiger Vorgang, welcher nach der Gesammtheit der Erfahrungen höchst unwahrscheinlich ist, würde natürlich streng widerlegt sein, sobald der Austritt nur einzelne der in der Zelle gelösten Stoffe betrifft[3]). Jedenfalls kann man sich zu Gunsten einer derartigen Mechanik nicht auf pulsirende Vacuolen berufen, bei denen, wenigstens in gewissen Fällen, ein Einreissen zur Entleerung der Innenflüssigkeit führt, welche dabei aber auch gänzlich verschwinden.

Eine Turgorsenkung käme natürlich auch zu stande, wenn, ohne Zuführung aus dem Innern der Zelle, in der Zellhaut plötzlich genügend wirksame Stoffe gebildet oder zugeleitet würden, doch machen einen solchen Vorgang alle unsere Erfahrungen möglichst

---

1) Die Permeabilität d. Protoplasma 1888, p. 82. (Separatabdruck aus Verslagen en Mededeelingen d. Akademie Amsterdam.)

2) Vgl. Pfeffer, Physiol. Untersuchungen 1873, p. 33.

3) In den Drüsenhaaren von Drosera trifft solches zu, da der im Zellsaft gelöste Farbstoff nicht entleert wird, doch liegen hier die Verhältnisse an sich etwas anders und es muss nicht allen Reizbewegungen dieselbe Mechanik zu Grunde liegen.

Digitized by Google

unwahrscheinlich. Ebenso ist kaum denkbar, dass durch eine active etwa wie eine Pumpe wirkende Thätigkeit, Wasser, unabhängig von osmotischen Leistungen, nach einer Seite getrieben und so der hydrostatische Druck in der Zelle vermindert oder vermehrt wird. Denn eine Veränderung um 1 bis 3 Atmosphären auf solche Weise ist nicht wohl zu verstehen, wenn auch die Möglichkeit eines activen einseitigen Transportes von Stoffen zugegeben werden muss[1]). Übrigens müsste eine derartige Action in einer Senkung des Turgors, d. h. in einem activen Hinausbefördern des Wassers in Folge der Reizung zu suchen sein, da sich in den Zellen, auch bei Mangel von Sauerstoff und beim Chloroformiren, immer die volle Turgorhöhe erhält und herstellt.

Kommen aber solche directe active Pumparbeit und ferner Stoffausgabe aus dem Protoplasma nicht in Betracht, so muss in der Erzielung der zur Reizbewegung nöthigen Turgorsenkung eine Verminderung der osmotischen Leistung des Zellsaftes allein massgebend oder doch wesentlich mitbetheiligt sein. Dieser Schluss ergiebt sich aus den früheren (p. 292) Erwägungen über das osmotische System, sobald man beachtet, dass in der Reizcontraction, trotz der constanten elastischen Eigenschaft der Zellhaut, der Zellsaft an Volumen abnimmt und dem entsprechend seine osmotische Leistung sich vermindert haben muss. Denn nachweislich stammt mindestens ein gutes Theil des austretenden Wassers, welches eine Volumabnahme der contrahirten Zelle um mehr als 20 % herbeiführen kann[2]), aus dem Zellsaft. Dabei können wir dahin gestellt lassen, ob gleichzeitig das Protoplasma an Volumen ab- oder zunimmt. Eine genaue Controle dieser Frage ist schwierig und noch nicht ausgeführt, doch hat es den Anschein, als ob mit der Verkürzung der Zelle die Wandschicht des Protoplasmas in den Staubfäden von Centaurea an Dicke gewinnt, während diese Wandschicht unverändert erscheint, wenn durch Festklemmen die Contraction des gereizten Filaments verhindert wird.

Wie dem aber auch sei, jedenfalls kann (wenn wir sachgemäss von den durch die Cohäsion möglichen relativ nur geringen Leistungen des Protoplasmas absehen) nach den gegebenen Erörterungen

1) Vgl. diese Abhandlung p. 283, 305.

2) Pfeffer, Physiol. Untersuchungen 1873, p. 96.

Digitized by Google

die Turgorkraft die osmotische Leistung des Zellsaftes nicht übertreffen. Dieserhalb ist in unserem Falle eine erhebliche Volumschwankung des Zellsaftes durch eine Variation des Quellungs- oder osmotischen Druckes im Protoplasma nicht möglich, denn bei Constanz der Spannung der Zellhaut und des osmotischen Drucks im Zellsaft kann aus diesem Wasser nicht hervorgepresst werden. Wie aber eine Druck- und damit verknüpfte Volumschwankung im Protoplasma wirken muss, ist leicht aus den Bedingungen für das Gleichgewicht des osmotischen Systems zu entnehmen (p. 293). Zur Wiederherstellung des Gleichgewichts würde z. B. bei einer Volumabnahme des Protoplasmas die Zellhaut sich ein wenig verkürzen, zugleich aber, der abnehmenden Spannung halber, der Zellsaft sich entsprechend durch osmotische Wasseraufnahme vergrössern. Analoge Verhältnisse würden sich mit einer angestrebten Volumzunahme des Protoplasmas ergeben. Dass aber auf diese Weise bei nicht auffällig verändertem Volumen des Protoplasmas keine ansehnlichen Volumänderungen des Zellsaftes und also auch keine Drucksenkungen von einigen Atmosphären erreichbar sind, bedarf wohl keiner näheren Discussion. Der Turgordruck könnte überhaupt nur zunehmen, wenn durch Entstehung osmotisch wirksamer Stoffe (oder durch Quellungskraft) eine Volumzunahme des Protoplasmas und dadurch eine Verkleinerung des Zellsaftraumes herbeigeführt würde. Dass aber durch eine einfache Überführung gelöster Stoffe aus dem Zellsaft in das Protoplasma, oder in umgekehrter Richtung, der Druck gegen die Zellwand unverändert bleibt, ist schon erörtert worden (p. 293). Auch habe ich schon früher (Osmot. Untersuchungen p. 181) darauf hingewiesen, wie z. B. die Volumcontrole der im Zellsaft liegenden Vacuolen über osmotische Variationen im Zellsaft vielleicht Aufschluss geben könnte.

Kam ich schon früher, unter der Voraussetzung des Fehlens von Exosmose, zu dem Schlusse, dass wahrscheinlichst in diesen Reizbewegungen eine Senkung der osmotischen Leistung im Zellsaft massgebend mitspiele[1]), so ist doch dieses jetzt, bei gleicher Voraussetzung, insbesondere deshalb präciser zu folgern, weil nachgewiesen wurde, dass, so lange Diosmose fehlt, die abschliessende Plasmahaut keinen Einfluss auf den osmotischen Druck hat. Die Möglichkeit,

1) Vgl. Pfeffer, Physiologie Bd. II, p. 239.

Digitized by Google

dass vom sensiblen Protoplasma aus im Zellsaft plötzlich verlaufende Reactionen veranlasst werden, ist jedenfalls zuzugeben (vgl. p. 314). Es handelt sich ja dabei nur um entsprechende molekulare Veränderungen, welche eine weitgehende Umsetzung nicht einmal nothwendig erfordern, und bekannt ist z. B. wie auf kleine Anstösse plötzlich colloidale Erstarrung oder eine Ausfällung in übersättigten Lösungen eintreten kann. Mechanisch würde z. B. auch eine Bildung von Rohrzucker aus Traubenzucker genügen, da damit die osmotische Leistung auf die Hälfte herabgedrückt wird. Und für die lebende Zelle können u. a. die zum Theil sehr plötzlich erfolgenden Ausscheidungen genannt werden, welche eine Einwirkung von Ammoncarbonat im Zellsaft mancher Pflanzen erzielt[1]). Eine Gegenreaction zur Wiederherstellung des früheren Zustandes ist, wie schon allgemein besprochen wurde, natürlich in solchen und ähnlichen Vorgängen in jedem Falle eine Nothwendigkeit[2]).

Nachdrücklich mag hier noch betont werden, dass eine Generalisirung der für bestimmte Pflanzen gewonnenen Erfahrungen durchaus nicht zulässig ist, dass vielmehr bei ähnlichen und noch mehr bei differenten Bewegungen schon die Zellmechanik verschieden sein und ausserdem noch andere Unterschiede in der Kette der veranlassenden Vorgänge bestehen können. Es ist ja selbstverständlich, dass habituell ähnliche Bewegungen durch verschiedene mechanische Mittel erreicht werden können. Kann man dieserhalb schon nicht von vornherein z. B. für die Staubfäden von Centaurea und Berberis volle Identität der Zellmechanik annehmen, so ist solches u. a. noch weniger für die Ranken der Fall, in deren Krümmungsbewegung ohnehin mit dem Wachsthum neue Factoren thätig eingreifen müssen. Auch können, selbst wenn der Turgor entscheidend mitspielt, doch bezüglich des Ortes und der Art der Entwicklung, sowie in mannigfacher Hinsicht Differenzen obwalten, ganz abgesehen von den Mannigfaltigkeiten, welche sich auf die specifisch eigenthümliche Perception des Reizes und die Verkettung dieses mit dem mechanischen Geschehen beziehen[3]).

---

1) Unters. a. d. botan. Institut zu Tübingen 1886, Bd. II, p. 239.

2) Vgl. p. 323.

3) Vgl. z. B. Pfeffer, Osmotische Untersuchungen 1877, p. 194; Physiologie Bd. II, p. 177, 232, 269 u. s. w. — An den angegebenen Stellen ist auch

Digitized by Google

Es ist hier nicht nöthig, auf diese schon bei anderer Gelegenheit dem Princip nach besprochenen allgemeinen Verhältnisse einzugehen. Beiläufig kann auch nur ein Blick auf die pulsirenden Vacuolen geworfen werden, welche ja darin etwas ähnliches wie Mimosa pudica oder die Staubfäden der Cynareen bieten, dass sie plötzlich ihren wässrigen Inhalt ganz oder theilweise entleeren und langsamer wieder auf die frühere Grösse zurückkehren. In Primordialzellen vollzieht sich dieser Vorgang ohne Vorhandensein einer Zellhaut, und z. B. in den Plasmodien der Myxomyceten kann ein von der Peripherie gegen die Innenmasse ausgeübter Druck nicht mitwirken. Denn diese Pulsationen gehen ungleichzeitig und von einander unabhängig vor sich und da sich auch unmittelbar benachbarte Vacuolen nicht beeinflussen, so können die bewirkenden Ursachen nur localisirt thätig sein[1]). Diese gegenseitige Unabhängigkeit gilt auch bezüglich der angrenzenden relativ stationären Vacuolen, die wie früher bemerkt (p. 192, 218), nur graduell von den pulsirenden Vacuolen verschieden sind.

Die Ursachen dieser Volumänderungen der Vacuolen sind noch nicht genügend aufgedeckt und wenn in bestimmten Fällen eine Entleerung augenscheinlich durch Einreissen erzielt wird, so muss ein solcher Vorgang deshalb nicht allgemein zutreffen[2]). Ein solches

---

z. B. auf Unterschiede in der Erzielung der Mechanik von Bewegungen hingewiesen, ebenso auf die Vortheile, welche für die Erforschung die mit elastischer Dehnung verknüpften Bewegungen bieten können, da hier der Mangel von Veränderung durch Wachsthum manches vereinfacht. Erklärungen aber, die Wachsthum für die Bewegungsmechanik fordern, sind für Gelenke nicht anwendbar und so kann in ihnen Heliotropismus und Geotropismus u. s. w. nicht in der Weise entstehen, wie es Wortmann's Hypothese fordert, die in jedem Falle ungleich starkes Wachsen in antagonistischen Geweben annimmt. Jedenfalls ist sehr wunderbar, dass Wortmann sich ganz einseitig an wachsende Organe hält und auf die Gelenke nicht einmal Bezug nimmt. Denn beachtet wollen sie für gleichnamige Vorgänge immer sein, wenn auch vielleicht die mechanischen Mittel der Ausführung im angedeuteten Sinne Differenzen bieten.

1) Über die Unabhängigkeit der Pulsation von der Existenz des Zellkernes vgl. p. 193 Anmerkung.

2) Vgl. Pfeffer, Physiologie Bd. II, p. 398 für pflanzliche Objecte. Ausgedehntere Mittheilung über animalische Organismen bei Bütschli, Klassen u. Ordnungen des Thierreichs 1889, p. 106, 712, 1411.

Digitized by Google

Einreissen ist überhaupt bei nur partieller Entleerung nicht gerade wahrscheinlich und in den früher (p. 219) besprochenen mit Anilinblau gefärbten und gefärbt bleibenden Vacuolen ausgeschlossen, da diese bei wiederholter Volumschwankung unvermeidlich den gelösten Farbstoff mehr und mehr verlieren müssten. Bei gänzlichem Schwinden wird freilich entweder eine schnelle und vollständige etwa diosmotische Entfernung der gelösten Stoffe oder eine Entleerung der Vacuole durch Einreissen der Plasmahaut stattfinden müssen. Letzteres kommt auch aus rein physikalischen Ursachen vor, wenn die Vacuolen mehr und mehr an die Peripherie, gegen die Vacuolenhaut oder die Hautschicht gedrängt werden. Doch kann kaum solchen rein physikalischen Ursachen, wie es BÜTSCHLI[1]) will, immer das vollständige Schwinden der pulsirenden Vacuolen entspringen, da solche Entleerung in dem Plasmodium auch an den tief im Protoplasma eingesenkten Vacuolen vorkommt.

Ob nun eine vom Einreissen unabhängige Entleerung der Vacuolen durch verminderte osmotische Leistung, sei es durch Ausgabe, sei es durch entsprechende Verwandlung der gelösten Stoffe, durch einen von der Plasmahaut und der nächsten Umgebung ausgehenden gesteigerten Centraldruck oder auf irgend eine andere Weise erreicht wird, ist zur Zeit nicht zu sagen. Schon eine Zunahme der physikalischen Oberflächenspannung würde wohl durch gesteigerten Centraldruck die zwar nicht näher bekannte, aber offenbar nicht sehr ansehnliche Energie liefern können. Bei der geringen Grösse der Vacuolen ist auch der im umgekehrten Verhältniss zum Radius zunehmende radiale Druck mit in Betracht zu ziehen (vgl. p. 298). Übrigens dürfte ein näheres Studium der pulsirenden Vacuolen wohl vielfache wichtige Anhaltspunkte über diese Art von Bewegungsmechanik im Allgemeinen liefern. Dabei bieten diese Objecte in methodischer Hinsicht mannigfache Angriffspunkte, von denen einige sich aus den Erfahrungen ergeben, welche bezüglich der Vacuolen der Myxomyceten und deren Verhalten mitgetheilt wurden.

---

1) l. c., p. 1431.

Digitized by Google

X. Zusammenfassung einiger Resultate.

Die Plasmahaut (Hautschicht und Vacuolenhaut) entsteht aus dem Cytoplasma unter den an der Grenzfläche gegen Wasser (vielleicht auch gegen andere Medien) gebotenen Bedingungen. Da letztere auch zur Forterhaltung nothwendig sind, so werden die aufbauenden Theile der Plasmahaut mit der Entfernung aus der Grenzfläche wieder zu Bausteinen des übrigen Cytoplasmas. Und wenn auch nicht gerade das gesammte Cytoplasma zur Formation von Plasmahaut geeignet ist (die Mikrosomen scheinen keinen Antheil dabei zu nehmen), so sind doch weder Hautschicht, noch Vacuolenhaut selbständig sich erhaltende und sich fortpflanzende Organe, wie Zellkern und Chromatophoren.

Da Hautschicht und Vacuolenhaut in derselben genetischen Beziehung zum Cytoplasma stehen, so sind sie auch nur durch die räumliche Lage und die damit verknüpften Verhältnisse unterschieden, können demgemäss mit dem Platzwechsel auch direct in einander verwandelt werden.

Die Plasmahaut bewahrt im Leben ähnliche plastische Eigenschaften wie das Cytoplasma. Dieses aber ist, vermöge der sofortigen Entstehung der Plasmahaut an der Oberfläche, in allem Wechsel der Gestaltung allseitig und continuirlich durch Plasmahaut abgegrenzt. Bei weitgehender Vacuolisirung einer Plasmaportion kann demgemäss der grössere Theil des Cytoplasmas zu Plasmahaut werden.

Die Plasmahaut vermag also ebensowohl durch Einschiebung neuer Theile aus dem Cytoplasma zu wachsen, wie auch, da wo sie fehlt, neu gebildet zu werden. Durch solche Neubildung wird an der Schnittfläche eines Plasmodiums das fehlende Hautschichtstück ergänzt und Vacuolenhaut um neu entstehende Vacuolen formirt.

Eine unzweifelhafte Neubildung von Vacuolen kann im Plasmodium erzielt werden, indem plötzlich Lösung von Asparaginkryställchen (oder auch anderen Stoffen) eingeleitet wird, welche zuvor in gesättigter Lösung aufgenommen worden waren. Die so auftretenden und sich weiter vergrössernden Vacuolen, und mit ihnen die abgrenzende Vacuolenhaut, entstehen, ohne dass zuvor eine entsprechende Plasmahaut um das Asparaginstückchen vorhanden war

und ohne dass kleinste oder grössere benachbarte Vacuolen in Mitleidenschaft gezogen werden. Aus diesen Beobachtungen geht auch mit Sicherheit hervor, dass in keiner Weise kleine Vacuolenbildner (Tonoplaste) zur Formirung von Vacuolenhaut und Vacuole nothwendig sind.

Diese künstlich erzeugten Vacuolen stimmen in jeder Weise mit denjenigen überein, welche sich normal im Plasmodium finden. Wie diese können auch die künstlichen Vacuolen Theilungen und Verschmelzungen ausführen und auch in diosmotischer Hinsicht konnte kein Unterschied gefunden werden. Diese Übereinstimmung bezieht sich zunächst auf die relativ stationären Vacuolen, welche aber mit den pulsirenden durch alle Zwischenstufen verknüpft sind und mässige Volumschwankungen wurden auch an künstlich erzeugten Vacuolen beobachtet.

Die entscheidenden Erfahrungen an Plasmodien dürfen um so mehr generalisirt werden, als alle Beobachtungen an anderen Protoplasten mit der gekennzeichneten Bildung von Hautschicht und Vacuolenhaut aus dem Cytoplasma aufs beste vereinbar sind und theilweise direct dafür sprechen. Dabei ist z. B. eine Erhaltung der Continuität der Hautschicht durch Zusammenneigen, sowie eine Vermehrung der Vacuolen durch Theilung, nicht nur möglich, sondern unter Umständen selbstverständlich und es kann sich immer nur darum handeln, in wie weit im gegebenen Falle u. a. Vacuolen durch Theilung oder durch Neubildung vermehrt werden.

Eine Neubildung von Vacuolenhaut würde in jedem Falle durch Einführung eines Tröpfchens wässriger Lösung in das Cytoplasma herbeigeführt, doch scheinen auch locale Imbibitionsdifferenzen zur Abgrenzung einer Vacuole führen zu können. Auf diese oder andere Weise mögen wohl normal oder bei gesteigerter Quellung in dem Cytoplasma neue Vacuolen ihren Ursprung nehmen.

Eine volle Einsicht in die Bedingungen und Vorgänge, welche zur Bildung der Plasmahaut führen, ist noch nicht erreicht. Kann auch die Plasmahaut nicht eine einfache physikalische Spannungshaut sein, so ist doch fraglich, ob ihre Entstehung schon durch bestimmte Oberflächenspannung herbeigeführt wird, oder ob Wassercontact mitzuwirken hat. Eine Entscheidung ist auch daraus nicht zu entnehmen, dass die Grenzfläche des Cytoplasmas gegen festes Asparagin die dios-

Digitized by Google

motischen Eigenschaften der Vacuolenhaut nicht besitzt. Übrigens scheint vitale Thätigkeit zur Formirung von Plasmahaut, sowie zur Äusserung der Plasticität in dem Protoplasten nicht nothwendig zu sein.

Kann man nur mit Wahrscheinlichkeit Proteïnstoffe als wesentliches Baumaterial der Plasmahaut ansprechen, so lässt sich doch mit Bestimmtheit sagen, dass die diosmotischen Eigenschaften der Plasmahaut nicht durch eine dünne Ölschicht oder durch imbibirendes Öl bedingt sind.

Den in Zellhaut eingeschlossenen Protoplasten kommt normal und nicht etwa als Folge eines Reizzustandes eine mehr oder weniger zähflüssige Consistenz zu. Eine solche besitzt auch der strömende Theil im Plasmodium, während der zwar auch weiche ruhende peripherische Theil immerhin eine ausreichende Cohäsion erreicht, um der angreifenden Stromkraft genügenden Widerstand entgegen setzen zu können. Doch ermöglicht der Wechsel zwischen diesem weichen und dem zähflüssigen Aggregatzustand die mannigfachen Ausgestaltungen des Plasmodiums mit den zur Verfügung stehenden Kräften.

Dieser im lebensthätigen Plasmodium aus inneren Ursachen sich abspielende Cohäsionswechsel scheint durch leichte locale Druck- und Stosswirkungen nicht wesentlich beeinflusst zu werden. Dagegen influiren äussere Verhältnisse durch Depression der normalen Thätigkeit auch auf die Cohäsionsverhältnisse im Plasmodium.

Die Schlussfolgerungen über die Bedeutung der Plasmahäute für diosmotischen Austausch und über die Ursachen der Anhäufung von Stoffen schliessen sich früheren Erörterungen an. Doch ist aus der ohne Vacuolenbildung möglichen allmählichen Lösung von Asparaginkryställchen im Plasmodium ein weiterer Beweis dafür zu entnehmen, dass das Cytoplasma die Verbreitung gelöster Stoffe leicht gestattet.

Die schon erwähnten Erfahrungen über die Abhängigkeit der Entstehung der Plasmahaut von der Natur des mit der Grenzfläche des Cytoplasmas in Berührung stehenden Körpers deuten bestimmt darauf hin, dass schon die Qualität des anstossenden Mediums die Eigenschaften und speciell die diosmotischen Eigenschaften der Plasmahaut beeinflusst.

Asparagin und Gyps scheinen durch die Plasmahäute der Plas-

Digitized by Google

modien leichter zu diosmiren als durch die höherer Pflanzen. Wie durch die Protoplaste dieser letzteren findet auch aus Plasmodien Methylenblau, nicht aber Anilinblau diosmotisch seinen Weg.

Mit der Separation gelöster Stoffe durch Hautschicht und Vacuolenhaut ist in früher gekennzeichneter Weise ein osmotisches System in der Zelle geschaffen. Höher als die osmotische Leistung des Zellsaftes kann indess der von dem Protoplast gegen die Zellhaut ausgeübte Druck (die Turgorkraft) nicht ausfallen, sofern das Protoplasma zähflüssigen Aggregatzustand besitzt. Für den Gleichgewichtszustand im osmotischen Systeme gilt dieses, gleichviel ob die nöthige Gegenleistung im Protoplasma durch Quellungskraft oder, ganz oder theilweise, durch Vorhandensein gelöster Stoffe erreicht wird.

Absolut vollständig kommt freilich der osmotische Druck nicht gegen die Zellhaut zur Wirkung, denn der Protoplasmakörper setzt der osmotischen Spannung einen gewissen Centraldruck entgegen, welcher indess bei der geringen Cohäsion im Protoplasma, mitsammt der Oberflächenspannung, nur einen geringen Bruchtheil des meist auf einige Atmosphären steigenden osmotischen Druckes ausmacht. Wenigstens gilt dieses für die gewöhnlichen Dimensionsverhältnisse in Zellen, während z. B. in sehr kleinen Vacuolen der besagte Centraldruck erheblicheren Werth erreichen kann.

Findet, wie hier vorausgesetzt wird, keine Diosmose statt, so ist die Höhe des osmotischen Druckes unabhängig von Filtrationswiderstand und überhaupt von der Qualität der abschliessenden Haut, gleichviel ob diese fest oder flüssig ist.

Demgemäss wird durch die physikalischen Versuche auch die osmotische Leistung in der Plasmahaut vollständiger und genauer bestimmt, als es bisher durch physiologische Methoden erreicht wurde. Nach den bisherigen physikalischen Erfahrungen entwickelt bei einem Gehalt von 0,1 Molekel im Liter die Lösung von Rohrzucker bei 13 bis 16° C. im Mittel einen osmotischen Druck von 172 cm Quecksilber (2,26 Atmosphären), die Lösung von Kalisalpeter einen Druck von 258 cm Quecksilber (3,4 Atmosphären). Einer einprocentigen Lösung von Rohrzucker entspricht also ein osmotischer Druck von 0,67, einer einprocentigen Lösung von Kalisalpeter von 3,37 (rund 3,4) Atmosphären und bei mässiger Concentration steigt der Druck proportional der Concentration. Durch diese Werthe, im Vergleich

Digitized by Google

mit der zur Aufhebung des Turgors gerade nöthigen Concentration, wird also bekanntlich auch der in der lebenden Zelle entwickelte osmotische Druck bemessen.

Abweichungen von den physikalisch zu fordernden osmotischen Leistungen würden anzeigen, dass durch anderweitige besondere active Leistungen der lebensthätigen Zelle eine Steigerung oder Verminderung der Turgorkraft herbeigeführt wurde.

Auf dem Boden der empirischen Ermittelungen über die durch Reiz ausgelöste Bewegungsmechanik in den Zellen der Staubfäden von Cynareen ist weiter zu folgern, dass die zur Bewegung nöthige Energie von dem Protoplasmakörper jedenfalls nicht durch elastische Kräfte, und in vollem Umfange auch nicht durch Imbibitionsvorgänge (Quellungskräfte) geliefert werden kann. Sofern die Reizbewegung nicht von einer exosmotischen Stoffausgabe abhängt, muss die plötzliche Turgorsenkung durch entsprechende vorübergehende Bildung von Stoffen geringerer osmotischer Leistung in der Zelle erzielt werden.

Digitized by Google

Erklärung der Abbildungen.

Tafel II.

Sämmtliche Figuren beziehen sich auf Chondrioderma difforme.

Fig. 1. Nach Aufnahme von Asparaginstückchen wurden in der p. 197 beschriebenen Weise durch Auswaschen mit Wasser Vacuolen erzeugt. Die Zeichnung wurde eine Stunde nach dieser Operation angefertigt, als bereits die Auflösung des Asparagins weiter fortgeschritten und in einzelnen Vacuolen, die kleinere Stückchen aufgenommen hatten, vollendet war. In der Figur ist, wie auch in Fig. 2 und 3, nur ein Stückchen des Plasmodiums abgebildet (200/1).

Fig. 2. Diese Figur ist einem Plasmodium entnommen, das nach Aufnahme der mit Anilinblau gefärbten Vitellinkrystalloide 8 Stunden in reinem Wasser verweilt hatte. Neben den blauen Vacuolen, welche zumeist noch ungelöstes und blau gefärbtes Vitellin enthalten, finden sich auch normal entstandene farblose Vacuolen (200/1).

Fig. 3. Stück eines Plasmodiums, welches durch Alkanna gefärbte Tröpfchen von Olivenöl aufnahm (200/1).

Fig. 4. Stück eines Plasmodiumstranges einige Minuten nach dem Durchschneiden in Wasser. An den hervorgewölbten Schnittflächen, welche durch den Mangel anhängender Fremdkörper gekennzeichnet sind, hat sich bereits ein sichtbarer Hyaloplasmasaum ausgebildet, der an dem Rande in das vor der Operation schon vorhandene Hyaloplasma continuirlich übergeht. Daneben liegen einige abgerissene Plasmaportionen (100/1).

Fig. 5 und 6. Vacuolenbildung durch Auflösung von aufgenommenen Asparaginstücken. Das Asparagin lag in beiden Fällen in Fig. *a* noch nicht in einer Vacuole, die aber nach schnellem Auswaschen des umgebenden Asparagins in Fig. 5 *b* nach 35 Sec., in Fig. 6 *b* nach 45 Sec. die in den Figuren gekennzeichnete Entwickelung erreichte und nun sich ziemlich schnell weiter vergrösserte (500/1).

Fig. 7 *a*, *b* und *c* stellen dieselbe Vacuole vor. In *b* liegt diese frei im strömenden Plasma und ist kugelig, während sie in *a* und *c* der ruhenden Plasmaschicht angepresst und entsprechend deformirt ist. Die Grenze des hier ziemlich mächtigen ruhenden Protoplasmas gegen das strömende Körnerplasma ist durch Schattirung markirt. Die Pfeile geben die Richtung des Stromes an. Die Vacuole war durch Gyps erzeugt, enthielt aber zur Zeit der Beobachtung nicht mehr ungelöste Substanz (500/1).

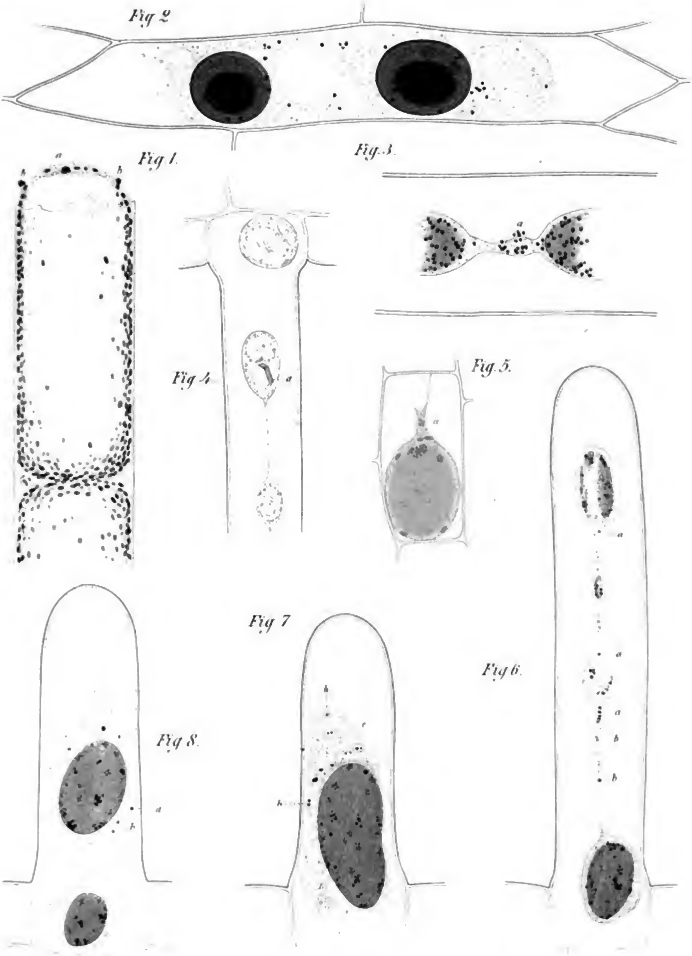
Fig. 8. Ähnliche Vacuole wie in Fig. 7. Die Vacuole wird durch die in der Richtung der Pfeile gehende und sich gabelnde Strömung entsprechend deformirt (500/1).

Digitized by Google

Inhaltsübersicht.

	Seite
I. Einleitung	187
II. Beobachtungen an dem Plasmodium der Myxomyceten	190
A. Allgemeines	190
B. Neubildung der Hautschicht	193
C. Künstliche Neubildung von Vacuolen	197
a) Methodisches und Vacuolenbildung durch Asparagin	197
b) Vacuolenbildung durch Gyps	204
c) Vacuolenbildung durch Vitellin	206
d) Methylenblau in Vitellinvacuolen	210
e) Einführung von Kongoroth und Lacmus	210
f) Versuche mit andern Körpern	211
g) Methodische Hinweise	211
D. Näheres über die Bildung der Vacuolen und der Vacuolenhaut	213
E. Übereinstimmung normaler und künstlicher Vacuolen	218
F. Allgemeine Bildungsursachen der Vacuolen	220
III. Die Vacuolen der Protoplasmakörper im Allgemeinen	224
IV. Ursachen der Entstehung der Vacuolenhaut	244
V. Aggregatzustand des Protoplasmas	253
A. Beobachtungen am Plasmodium der Myxomyceten	256
B. Über die Cohäsion des Protoplasmas in hautumkleideten Zellen.	267
C. Blicke auf Ausgestaltung und Strömung in Protoplasten	272
VI. Allgemeine Bedingungen für Aufnahme und Speicherung von Körpern.	279
VII. Das osmotische System in der Zelle	290
VIII. Der osmotische Druck in der Zelle	299
IX. Blicke auf Druckwirkungen als Ursache einiger Bewegungen	320
X. Zusammenfassung einiger Resultate	338
Erklärung der Abbildungen	343

Digitized by Google



Digitized by Google

Fig. 1

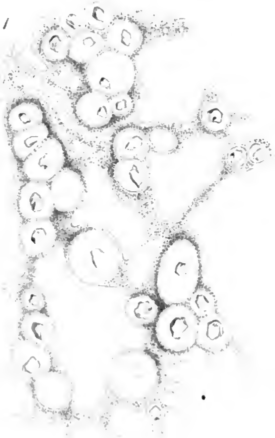


Fig. 2

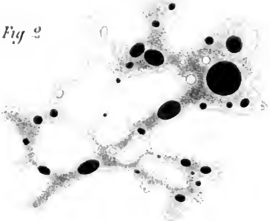


Fig. 4

Fig. 3

Fig. 8

Fig. 6

a b

Fig. 5

a b

Fig. 7

a b c

Digitized by Google

DIE

DENUDATION IN DER WÜSTE

UND IHRE

GEOLOGISCHE BEDEUTUNG

UNTERSUCHUNGEN ÜBER DIE BILDUNG DER SEDIMENTE IN DEN ÄGYPTISCHEN WÜSTEN

VON

JOHANNES WALTHER,

A. O. PROFESSOR AN DER UNIVERSITÄT JENA.

Des XVI. Bandes der Abhandlungen der mathematisch-physischen Classe der Königl. Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften

N° III.

MIT 8 TAFELN UND 99 ZINKÄTZUNGEN.

LEIPZIG

BEI S. HIRZEL

1891.

Digitized by Google

Das Manuscript eingeliefert am 20. October 1890.
Der Druck beendet am 19. Januar 1891.

Digitized by Google

DIE
DENUDATION IN DER WÜSTE
UND IHRE
GEOLOGISCHE BEDEUTUNG.

UNTERSUCHUNGEN ÜBER DIE BILDUNG DER SEDIMENTE
IN DEN ÄGYPTISCHEN WÜSTEN

VON

JOHANNES WALTHER.

Digitized by Google

Digitized by Google

Ein grosser Theil der Erdrinde ist mit Gesteinen bedeckt, deren Eigenschaften den Schluss erlauben, dass sie weder die ursprüngliche Erstarrungskruste der Erde darstellen, noch feurigflüssig aus dem Erdinnern hervorgedrungen sind. Vielmehr lassen dieselben leicht erkennen, dass sie unter dem Einfluss des Wassers, des Gletschereises oder des Windes abgelagert worden sind, dass sie aus den Überresten von Pflanzen, den Skeletten von Thieren oder aus den Bruchstücken schon bestehender Felsarten zusammengesetzt und gebildet worden sind. Und an den Geologen, der es sich zur Aufgabe macht, die Entstehung dieser »Sedimentgesteine« zu erforschen, tritt die Aufgabe heran, diejenigen Vorgänge zu untersuchen und verfolgen, welche heutzutage Gesteinsmaterial erzeugen und Gesteine bilden. Indem wir derartige Vorgänge der Gegenwart kennen lernen, werden wir in den Stand gesetzt, ein empierisch begründetes Urtheil abzugeben über Processe, die sich vor Jahrmillionen abgespielt haben, deren Resultate in den Sedimentgesteinen der geologischen Formationen uns entgegentreten. Die Vorgänge der Gegenwart werden uns ein Schlüssel für die Räthsel der Vergangenheit.

Manche dieser Probleme der dynamischen Geologie sind überall und ohne Mühe zu studieren. Die Schuttablagerung im Bette oder an der Mündung eines Flusses, die Bildung der Moränen an den Gletschern, die Entstehung des Meeressandes an den Küsten, die Eruptionen eines Vulkanes, das sind Vorgänge, welche leicht zu beobachten sind und deren Schilderungen daher in geologischen Lehrbüchern einen breiten Raum einnehmen. Lückenvoller sind aber schon die Abschnitte über die Vorgänge am Meeresgrunde über die Bildung der Korallenriffe und besonders über die geologischen

Digitized by Google

Vorgänge im Tropenlande und in den Wüsten. Obwohl es sich leicht nachweisen lässt, dass viele Gebiete der jetzigen gemässigten oder kalten Zone früher ein tropisches Klima besassen und demzufolge durch geologische Perioden hindurch unter dem Einfluss der meteorologischen Kräfte des Tropenklimas standen, so sucht man doch meist vergeblich nach einer Schilderung der letzteren und einer Würdigung derselben für geologische Betrachtungen. In v. Richthofen's »Führer für Forschungsreisende« wird, meines Wissens zum erstenmale, der Versuch gemacht, ausser dem fliessenden und dem gefrorenen Wasser auch Tropenregen und Wüstenwind in die Reihe der geologisch wirksamen Kräfte ihrer Bedeutung gemäss einzuordnen.

Aber auch noch von einen anderen Gesichtspunkt erscheint das Studium der Tropen- und Wüstenländer für die Geologie nutzbringend. In unseren gemässigten Zonen beobachten wir eine complicierte Vereinigung sehr verschiedenartiger meteorologischer Kräfte. Trockne und feuchte Luft, Regen und Sonne, Eis und Hitze wirken zu verschiedenen Jahreszeiten abwechselnd auf die Felsen ein, um sie zu zerstören, und schwer ist es, die Wirkungssphäre jeder einzelnen dieser Kräfte gegen die andere abzugrenzen. Wollen wir daher die geologische Thätigkeit unseres winterlichen Eises verstehen und würdigen lernen, so müssen wir nach dem Polargebiet gehen, wo die geologische Thätigkeit des Eises alle andern meteorologischen Kräfte an Leistungsfähigkeit übertrifft; wollen wir untersuchen, welchen Einfluss Gewitterregen ausüben, so gilt es die Tropen aufzusuchen, wo diese eine lange Zeit des Jahres unumschränkt herrschen; und wenn wir untersuchen wollen, welche Wirkungen vom Wind und von dem Wechsel der Temperatur vollzogen werden, dann müssen wir in die Wüste reisen, wo trockene Luft und Sandstürme ununterbrochen regieren und wo die geologische Thätigkeit der Atmosphärilien im Wesentlichen durch diese beiden Factoren bestimmt wird. Die Kenntniss dieser typischen, wenn auch extremen Denudationsprocesse lehrt uns dann leicht die minder bedeutenden Erscheinungen solcher Art in Europa verstehen.

Geologische Thatsachen lassen mit einiger Sicherheit erkennen, dass die Vertheilung von Wasser und Land, von Klima und Vegetation in vergangenen Erdepochen eine wesentlich andere gewesen

Digitized by Google

sei, als heutzutage. Blätter und Blüthen des Brotfruchtbaumes findet man in den tertiären Schichten Grönlands, und Mollusken des Polarmeeres haben ihre Schalen in den fossilen Schichten Siciliens hinterlassen als Zeugen eines kälteren Klimas in südlichen Breiten. Da aber Tropenklima und arktisches Glacialgebiet im Laufe der Zeiten andere Räume auf der Erdoberfläche einnahmen als in der Gegenwart, so ist es naheliegend anzunehmen, dass auch Steppen und Wüstengebiete in der Vergangenheit anders vertheilt waren, dass wir ihre fossilen Überreste in den Schichten der Erdrinde ebenso entdecken werden, wie fossile Moränen oder Ablagerungen des Tropenklimas. Wenn es also gelingen soll, die Reste »fossiler Wüsten« zu erkennen, so müssen wir zuerst die Ablagerungen studieren, welche sich vor unseren Augen in den gegenwärtigen Wüsten bilden.

Endlich sind gerade die ägyptischen Wüsten vortrefflich geeignet, um das Problem zu studieren, ob in historisch messbarer Zeit eine Veränderung des Klimas eingetreten sei. Den Geologen interessirt es lebhaft zu wissen, innerhalb welcher Zeiträume das Klima constant oder wechselnd ist. Der Wunsch, die klimatischen Veränderungen der Vorzeit nach Jahren zu bestimmen, dürfte sich nirgends leichter ausführen lassen, als in dem Lande, welches die ältesten Denkmale von Menschenhand besitzt und wo seit 5000 Jahren historisch datierte Inschriften dem Felsen eingemeiselt sind, so dass es nicht schwer fällt, meteorologische und geologische Phänomene mit diesen Zeitangaben zu verknüpfen.

Diese Erwägungen waren es, welche mich bestimmten, eine längere Reise durch die ägyptischen Wüsten zu unternehmen. Ich wollte weder unbekannte Gebiete topographisch durchforschen, noch geologische Profile im Einzelnen stratigraphisch untersuchen, sondern die Fragen, welche ich mir stellte, waren folgende:

Welche meteorologischen Kräfte sind in der Wüste thätig?

Wie zerstören dieselben die Felsen?

Was ist das Endresultat dieser Processe?

Ist das Relief der heutigen Wüste unter dem Einfluss anderer Kräfte entstanden, als heutzutage dort wirksam sind?

Woran erkennt man fossile Wüsten?

Digitized by Google

Ich habe mich bestrebt, möglichst unbefangen diese Probleme zu untersuchen und einige hoffe ich ihrer Lösung näher gebracht zu haben. Bei der Bedeutung aber, die Luft und Wind für die Umbildung der Erdoberfläche nicht nur in der Wüste besitzen, habe ich, ausser meinen eigenen Beobachtungen, alle gut beobachteten Thatsachen, die ich bei meinen Literaturstudien fand, dieser Arbeit eingefügt, in der Hoffnung, dadurch die wichtigsten Daten über die geologische Thätigkeit des Windes den Fachgenossen zu sammeln.

Manche Thatsache, deren Tragweite ich nicht genügend würdige, wird vielleicht Anderen nützen und ihnen Erscheinungen erklären helfen, die bis dahin räthselhaft waren.

Die Reise wurde im Frühjahr 1887 unternommen mit Unterstützung der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Leipzig. (Bei einem zweiten Aufenthalt in Ägypten im Frühjahr 1889 hatte ich Gelegenheit auf mehreren Excursionen meine früheren Beobachtungen zu ergänzen.) Über die auf derselben Reise von mir angestellten Untersuchungen der Korallenriffe habe ich in diesen Abhandlungen Bd. XXIV geschrieben. In vorliegender Studie veröffentliche ich die zweite Hälfte der von mir damals gemachten Beobachtungen, und die Königliche Gesellschaft der Wissenschaften verpflichtet mich zu erneutem Dank durch die Aufnahme auch dieser Arbeit in die Schriften der Gesellschaft und die freigebige Ausstattung derselben mit Illustrationen und Tafeln.

Wollte ich meine oben angeführten Probleme vergleichend studieren und dadurch eine grössere Sicherheit meiner eventuellen Resultate erzielen, so musste ich die Wüste in ihrer Mannigfaltigkeit sehen und weniger die gleichartigen Sandebenen, als die Ränder der Gebirge aufsuchen, um dort eine grössere Anzahl verschiedenartiger Gesteine unter dem Einfluss der wüstenbildenden Kräfte zu untersuchen. Nachdem ich die weitere Umgebung von Cairo auf mehreren Tagereisen kennen gelernt hatte, ritt ich von Sues längs der Küsten des Rothen Meeres bis Râs Abû Senîme, zog von hier durch Uâdi Budra, Uâdi Mokátteb, Uâdi Feirân, Uâdi Hebrân nach Tôr, um hier einige Wochen lang Riffstudien zu machen. Dann miethete ich neue Dromedare und zog, die Wüste Gaâ mehrmal kreuzend, bis zum Râs Muhámmed und durch die Randgebirge der südlichen Sinaihalbinsel nach Tôr zurück. Von dort ritt ich durch das Arabagebirge bis Râs Abû

Digitized by Google

Senîme und segelte auf einem arabischen Fischerboot von hier nach der afrikanischen Küste, einer Einladung Professor SCHWEINFURTH's nach dem Uâdi Arabâh folgend. Gemeinsam zogen wir dann nach dem Kloster St. Anton und durch das Uâdi Ashar nach dem Plateau der südlichen Galâla, wo wir mehrere Tage im Uâdi Omm Ruthi lagerten. Von hier kehrte ich, nur von zwei Maâsibeduinen begleitet, nach dem Uâdi Arabâh zurück und erreichte nach sechstägigem Ritt durch Uâdi Abû Rimth, Uâdi Ssannûr, Uâdi el Schêb das Nilthal bei Beni Suéf.

Dem verehrten Manne aber, unter dessen Führung ich meine ersten Wüstenexcursionen unternahm, der mich vertraut machte mit der Wüste und ihren Räthseln, in dessen Zelt ich unvergessliche Tage verlebt habe, Herrn Professor Dr. SCHWEINFURTH möchte ich an dieser Stelle von Herzen danken für alle Anregung und Förderung, die er mir in so reichem Maasse zu Theil werden liess. Er hat in mir manchen Gedanken angeregt, den ich hier weiter ausgeführt habe, und meine eigene Leistung erscheint mir klein und unbedeutend verglichen mit dem reichen Schatz von Erfahrungen und Urtheilen, den er auf mich übertrug.

Auch fühle ich mich zu grossem Dank verpflichtet gegenüber Herrn Hofrath PERTHES und den Beamten des Geographischen Instituts in Gotha, für die Erlaubniss, die reiche Bibliothek seltener und kostbarer Werke über die nordafrikanische Wüste benutzen zu dürfen.

Einen kurzen Bericht über meine Wüstenstudien habe ich in den Verhandlungen der Gesellschaft für Erdkunde zu Berlin 1888 Nr. 6 veröffentlicht, eine Anzahl hierhergehöriger Beobachtungen finden sich erwähnt in meiner Abhandlung »Die Korallenriffe der Sinaihalbinsel« und endlich habe ich über »Kantengerölle aus der Galalawüste« in den Berichten der Königl. Ges. der Wissenschaften (Nov. 1887) Mittheilungen gemacht.

Digitized by Google

I. Meteorologie der Wüste.

Wer zum ersten Male die scharfe Grenze überschreitet, welche den fruchtbaren Schlamm des Nilthales von der leblosen Wüste trennt, und mit aufmerksamem Auge die Conturen der Wüstenberge, den Kies des Bodens und die Gehänge der Thäler betrachtet, oder selbst wer die naturwahren Wüstenbilder von Remelé[1]), Zittel[2]), Bernard[3]) und anderen Forschern kritisch ansieht, dem muss es auffallen, dass die Oberflächenformen in der Wüste sich gründlich unterscheiden von den topographischen Typen, welche wir in der gemässigten Zone oder im Tropenlande zu sehen gewohnt sind.

Es ist nicht nur der Mangel der Vegetation, nicht nur die weite Verbreitung des Sandes, nicht nur die grelle Schattenvertheilung, die auf einem guten Wüstenbild charakteristisch erscheinen, sondern die Form der Berge, das Profil der Thäler, die Beschaffenheit der Schutthalden, die Gestalt der Gesteinsblöcke, die Oberfläche der Felsen, die Verbindung weiter Ebenen und isoliert daraus hervortretender Berge, — Alles sieht anders aus, als die entsprechenden Erscheinungen in Europa. Und wer für solche Bilder ein aufmerksames Auge hat, der wird beim Antritt einer Wüstenreise viel mehr als durch die ungewohnte zigeunerartige Lebensweise, durch die vollkommen neue und ungewohnte Umgebung überrascht. Hat man aber erst einige Wochen in der Wüste zugebracht, so hat man sich, sonderbarerweise, so sehr an die eigenartigen Erschei-

---

1) Remelé, Photographien von der Rohlfs'schen Expedition in die lybische Wüste.

2) Zittel, Beiträge zur Geologie der libyschen Wüste, Palaeontographica, Bd. XXX.

3) Bernard, Quatre mois dans le Sahara, Paris 1881.

Digitized by Google

nungen gewöhnt, dass man sie als etwas Selbstverständliches hinnimmt, und die Fähigkeit verliert, sie als etwas Besonderes zu betrachten. Ich habe an mir selbst die Erfahrung gemacht, dass ich nach 70 tägiger Kamelreise kaum mehr im Stande war meine Beobachtungen weiterzuführen, weil ich in den Zeugen und Circusbildungen, in den Neulingen und den geschwärzten Felsen Gewohntes erblickte und diese Erscheinungen als so selbstverständlich hinnahm, wie das salzige Trinkwasser und die ungesäuerten Mehlfladen.

Daraus erkläre ich es mir, dass manche höchst sonderbaren Phänomene, welche die Wüste bietet, von hervorragenden Reisenden gering geachtet worden sind; bei Beginn der Reise wird alle Thätigkeit durch die Reise selbst in Anspruch genommen, später ist der Reisende an die Wüste gewöhnt, und erkennt nicht mehr das Neue.

Ich war auf einem Theil meiner Reise durch die Gastfreundschaft, die mir Herr Professor Schweinfurth gewährte, aller Sorge um die Reise selbst enthoben[1]. Daher habe ich manche Erscheinung genauer und eingehender verfolgen können, als es mir möglich gewesen wäre, wenn ich mich um die Karawane viel hätte kümmern müssen.

Eine Erscheinung, welche mir beim Studium der Wüstenliteratur ebenfalls auffiel ist die, dass viele Reisende geneigt sind anzunehmen, dass die Bildung der Wüste durch andere, der jetzigen Wüste fremde Kräfte erfolgt sei. Gewaltige Wasserfluthen, Meereswogen, ja sogar Gletscher werden als formgebende Factoren angenommen, ohne dass man sich die Frage vorlegte, ob nicht dieselben Kräfte, welche heutzutage in der Wüste herrschen, auch die sonderbaren Erscheinungsformen der Wüste zustande bringen konnten.

Ehe ich daher die Wüstenbildungen selbst behandle, muss ich eine kurze Übersicht der wüstenbildenden Kräfte geben; nur dann werden wir mit Kritik an die Beurtheilung ihrer Wirkungsart herantreten können.

---

1) Am Sinai gestattete mir die Tüchtigkeit meines Dolmetschers Herrn Alfred Kaiser z. Z. in Tôr am Sinai, ganz meinen Problemen leben zu können.

Digitized by Google

1. Regenniederschläge.

»Das Wort Wüste ist ursprünglich ein pflanzengeographischer Begriff und bezeichnet einen völlig oder beinahe völlig von Pflanzen entblösten Boden«[1]. Da aber der Pflanzenwuchs selbst eine Folgeerscheinung eines bestimmten Klimas ist, so müssen wir bei unseren Betrachtungen von den klimatischen Factoren ausgehen. Auch ROHLFS, welcher die Wüste kennt wie Wenige, sagt: »Die Wüste ist das Gebiet, in dem kein regelmässiger feuchter Niederschlag stattfindet, wo deshalb kein, Pflanze wächst, die des Regens bedarf, und wo kein grosses vierfüssiges Raubthier lebt«[2], und wenn ich endlich RUSSEGGER erwähnen darf, der die Grenzen der afrikanischen Wüsten nach Süden überschritt, so sagt der[3]: »Die Wüsten, im eigentlichen Sinne des Wortes, enden mit der Grenze der tropischen Regen, doch nicht plötzlich, sondern nur allmählich in jenes Terrain übergehend, das in der Regenzeit eine mit dichtem Gras bewachsene Fläche, in der trockenen Jahreszeit ein dürres Stoppelfeld darstellt und zum Theil mit Mimosenwäldern von ungeheuerer Ausdehnung bedeckt ist. Diesen Übergang in Savannenland sieht man am deutlichsten in der Bahiuda.«

Es wäre irrthümlich, wollte man annehmen, dass es in der Wüste überhaupt nicht regne; nur regelmässige Niederschläge sind der Wüste fremd.

In In-Sâlah am Fusse des Abaggâr hatte es 20 Jahre lang nicht ein einziges Mal geregnet, obwohl nicht fern von da im Gebirge Schnee fällt[4]. In Innerarabien verlangt man für einen guten Jahrgang, dass es in 12 Jahren zehnmal je eine halbe Stunde regnet, und EUTING[5] beobachtete einen dreitägigen Regen, wie sie nur alle 30 Jahre vorkommen. Am 4. Februar 1874 fiel in Dachel ein ausgiebiger Landregen, wie sie in dieser Oase durchschnittlich alle 2—3 Jahre einmal vorkommen[6]. Der Regen, den die ROHLFS'sche Expedition erlebte,

1) PESCHEL, Neue Probleme, S. 154.

2) G. ROHLFS, Quer durch Africa, S. 195.

3) J. RUSSEGGER, Reisen in Europa, Asien und Africa, Bd. II, S. 525.

4) DUVEYRIER, Les Touareg du Nord, p. 118.

5) EUTING, Verh. d. Ges. f. Erdkunde zu Berlin 1886, S. 270.

6) ROHLFS in litt. Weserzeitung 11. März 1874.

Nach Aussage des Scheich el Beled von Dachel findet alle 2—3 Jahre dort ein stärkerer Landregen statt.

Digitized by Google

am »Regenfeld« in der libyschen Wüste, ergab 16 mm Niederschlag[1]), und Jordan beschreibt einen zwar regenlosen doch feuchten Morgen am 24. Januar 1884: »Die aufgehende Sonne zeigte den, nun leider nicht mehr unbekannten gelbgrauen Samumhimmel, und als grosse Merkwürdigkeit einen ganz nassen Erdboden. Die Zeltwände waren nass wie von einem Regen und das Hygrometer zeigte fast 1000° relative Feuchtigkeit.«

Als ich am 4. April 1887 in der südlichen Sinaihalbinsel reiste und gegen Abend Regenwolken im Westen aufstiegen, erzählten meine Beduinen, dass es seit drei Jahren nicht geregnet habe und waren nicht eher von der Nähe des Gewitters zu überzeugen, bis der Regenguss unter Donner und Blitz herniederstürzte. Da alle Regen in der Wüste als Strichregen auftreten, kann es vorkommen, dass gewisse Gebiete Jahrhunderte hindurch nie einen Tropfen Regen erhalten.

»Regengüsse[2]) sind nicht von langer Dauer, kommen aber in den verschiedensten Thälern gar nicht selten zur Beobachtung und werden durch die Plötzlichkeit ihres Auftretens oft gefährlich. Fast alljährlich geht eine Anzahl von Eseln, Schafen und Ziegen bei der allzuplötzlichen Füllung eines Flussbettes zu Grunde und selbst Kamele unterliegen nicht selten diesem allzu reichen Segen des Himmels.«

»Da der Regen[3]) in einem Wüstenlande wegen seiner meist sehr grossen Heftigkeit und der Vegetationsarmuth nur wenig in den Boden dringt, so kann fast die ganze Kraft auf Fortführung fester Massen verwendet werden. Hierdurch werden die zuweilen hunderte von Kilometer langen Wadi's in ihrer Gestalt erhalten, und Felsmassen, welche von continuierlichen Strömen nicht bewegt werden, werden mit grosser Gewalt in ihnen abwärts getrieben.«

Welche gewaltigen Wassermassen bei einem solchen Wüstenregen herniedergehen, das habe ich am 4. April 1887 selbst beobachten können und mich am folgenden Tage überzeugt von den Verheerungen, die dieses Wasser in den Uâdis angerichtet hatte.

---

1) Jordan in litt. Kölnische Zeitung 16. April 1874.

2) Nachtigal, Sahara und Sudan I, S. 411.

3) v. Richthofen, Führer für Forschungsreisende p. 154.

Digitized by Google

Kilometerbreit war das Wasser durch die Thäler geflossen, hatte Schlamm und Geröll, Sand und Gestrüpp weithin verschleppt. Man erzählte mir am Sinai von einer Beduinenfamilie, welche in einem engen Thal durch einen solchen Gewitterregen überrascht, mehrere Menschen und eine Anzahl Dromedare verlor.

»J'ai[1]) eu l'occasion le 30 janvier 1861 étant à Oursel, au pied du Tasîli, d'observer le débordement d'un des nombreux torrents qui descendent de cette montagne. La rapidité du courant était d'un mètre à la seconde et les eaux charriaient des alluvions dans des proportions telles, que je regrette de ne pas en avoir constaté la quantité.«

»Au[2]) printemps de 1862 une pluie d'orage tombée sur le versant Ouest du Ahaggàr amène de telles quantités d'eau dans les vallées d'Idjeloudjâl et de Tarhît qu'elles entraînèrent une partie de la montagne. Trente quatre personnes et un grand nombre de chameaux furent noyés.«

»Avant 1856[3]) sur la rive gauche de l'Ouadi-Titershîn existait une ligne de dunes, du nom d'Azelkha-n-Bôdelkha, assez hautes pourque les chameaux ne pussent les franchir. Advint alors une crue accidentelle dans l'ouàdi et elle eut la puissance de faire disparaître toute la masse du sable qui composait ces dunes.«

Der Mangel einer geschlossenen Vegetationsdecke muss bei Beurtheilung der Wirkung eines Wüstenregens mit in Rechnung gezogen werden. Sehen wir doch häufig genug bei uns in Europa, wie verschieden stark die erodierende Wirkung eines Regengusses auf einer grasbewachsenen Fläche oder auf einem vegetationslosen Stück Ackerland ist. In der Wüste, wo fast aller Boden von Pflanzen entblöst ist, kann daher ein Regenguss unvergleichlich stärker denudieren als in unseren Breiten.

Endlich werden wir von F. VON RICHTHOFEN[4]) auf einen wichtigen Vorgang aufmerksam gemacht wenn er sagt: »Der periodische

---

1) DUVEYRIER, Les Touareg du Nord p. 39.

2) l. c. p. 41.

3) l. c. p. 42.

4) v. RICHTHOFEN, Führer für Forschungsreisende p. 153. Bei Besprechung der Uadi-schotter werden wir hierauf zurückkommen.

Digitized by Google

Wechsel der Wassermassen ist ein sehr wichtiger, vom Klima abhängiger Factor für die Erosion. Ein Fluss, welcher periodisch anschwillt, übt daher eine viel grössere erodierende und transportierende Kraft aus, als ein solcher, welcher bei gleichem Mittel stets dieselbe Wassermasse führt. Es geht daraus hervor, dass das Bett eines Flusses sich nach der Vertheilung der Kräfte bei Hochwasser gestaltet.«

Die erodierende und transportierende Leistung solcher vereinzelter Gewittergüsse in der Wüste wird auch noch dadurch wesentlich gesteigert, dass, mit Ausnahme der Thalsohlen, aller Schutt in der Wüste durch andere Kräfte erzeugt und aufgehäuft wird, als in Europa geschieht. Bei uns dürfte, von Bergstürzen abgesehen, aller Gehängeschutt durch Wasser zusammengetragen und aufgeschichtet worden sein, und leicht fällt es uns, auf den ersten Blick zu unterscheiden, ob eine solche Schuttmasse aus übereinandergestürzten, oder aus zusammengeschwemmten Steinen besteht, denn in dem letzteren Falle liegen die Steine viel dichter zusammen, und sind ausserdem durch Thonschlamm miteinander verklebt. Die durch einen Bergsturz entstandenen Schuttanhäufungen aber liegen, wie man sich im Hochgebirge leicht überzeugen kann, locker aufeinander und kein vertrockneter Schlamm verklebt die einzelnen Stücke. Genau so sind die meisten Schutthalden in der Wüste beschaffen, welche ohne Mithülfe von Wasser aufgehäuft, so locker übereinander liegen, dass es überaus schwierig ist, über eine solche Halde in der Wüste hinweg zu klettern. Alles kommt sofort in Bewegung und kollert thalabwärts. Das erschwert das Bergklettern in der Wüste sehr, und macht es oft unmöglich eine Felswand zu ersteigen.

Trifft nun einer jener seltenen Wüstenregen mit gewaltigem Sturz auf eine solche Halde locker übereinander liegender Steine, dann reisst das Wasser viel mehr Schutt mit in die Tiefe, als bei uns unter veränderten Bedingungen geschieht. Der häufig fallende Regen verkeilt bei uns einen Stein in den anderen, und eine Schutthalde ist oft ebenso widerstandsfähig wie eine Bergwand, die aus Mergelkalk besteht; in der Wüste liegen die Steine des Schuttes gelockert nebeneinander und allen verkittenden Schlammcäment hat die Sonne gelockert und der Wind entführt. Jetzt trifft der Sturzbach auf einen Haufen labiler Fragmente und übt eine transportierende Kraft aus,

Digitized by Google

die ihm in Europa nicht möglich wäre. Deshalb scheint mir SCHWEINFURTH's Wort so treffend: in der Wüste warten die Gerölle des Gehängeschuttes auf den ersten Regen, und sind vorbereitet, um sofort mit in die Tiefe gerissen zu werden.

Ähnlich, wenn auch in geringerem Maasse, wird der Schutt in der Sohle eines Uâdi durch die Wüstenluft gelockert, und wenn die Wasser daherbrausen, dann transportieren sie viel mehr Geröll in kurzer Zeit, als wenn ein kleines Bächlein das ganze Jahr sich mühte, grosse Felsblöcke vorwärts zu schieben.

Absolut regenlos ist also sicherlich kein Theil der afrikanischen Wüsten, es fehlen regelmässige Regenniederschläge, allein die seltenen Strichregen stürzen mit grosser Gewalt hernieder und sind imstande, eine grössere mechanische Wirkung in kurzer Zeit auszuüben, als wenn dieselbe Regenmenge sich auf eine Reihe von Regentagen vertheilte.

Da Schnee nnd Eis zwar in manchen Theilen der Wüste, aber immer als seltene Ausnahme vorkommen, so darf ihre geologische Thätigkeit in der Gegenwart als unwichtig betrachtet und hier übergangen werden. Die Thätigkeit der Luftfeuchtigkeit und des Thaues wird unter »Verwitterung« besprochen werden. Aber ich muss darauf hinweisen, dass der Thau in der Wüste eine relativ seltene Erscheinung ist. Ich habe unter 80 Morgen, die ich, zum Theil ohne Zelt campierend, in der Wüste verlebt habe, etwa 6 Thautage beobachtet. Das Nilthal unterscheidet sich hierin sehr wesentlich von der Wüste und das Urtheil von VOLKENS über den vermeintlichen Thaureichthum der Wüste findet darin seine Erklärung. VOLKENS schreibt:[1]) »Im innigen Zusammenhang mit der Luftfeuchtigkeit steht die Bildung von Nebel und Thau. Erstere kommen Morgens in der Wüste nur während der Winter- und Frühjahrsmonate vor, sind aber in dieser Zeit eine sehr gewöhnliche Erscheinung und oft von einer Dichtigkeit, dass man kaum zehn Schritte weit sehen kann. In den meisten Fällen entstehen und verschwinden sie sehr schnell, senken sich wie eine Wolke herab und zerfliessen wieder; seltener dauern sie bis zum Mittag an. Selbstverständlich ist an solchen nebeligen

1) VOLKENS, Die Flora der ägyptisch-arabischen Wüste, Berlin 1887, S. 12.

Digitized by Google

Tagen auch Thaufall vorhanden, indessen beschränkt er sich nicht blos auf diese, ist vielmehr von November bis zum April fast ausnahmslos jeden Morgen zu beobachten.«

Diese Beobachtungen sind für die Beobachtungsorte Cairo und Heluan, beide auf der Grenze von Nilthal und Wüste gelegen, gewiss sehr zutreffend, wenn aber Volkens weiter schreibt: »Mir ist es unverständlich geblieben, wie viele Reisende von dem Fehlen des Thau in der Wüste sprechen können«, so erklärt sich diese Erscheinung sehr einfach dadurch, dass Volkens nicht in der Wüste selbst, fern vom Nilthal, beobachtet hat, und sich deshalb kein zutreffendes Urtheil über die Luftfeuchtigkeit der eigentlichen Wüste bilden konnte.

2. Temperatur.

Während im Gebiete des Tropengürtels und des Äquators ebenso wie in der Polarregion die Temperatur geringen täglichen Schwankungen unterworfen ist, zeichnen sich die dazwischen liegenden Klimazonen durch starke Wärmeunterschiede innerhalb kurzer Frist aus. In unserer gemässigten Zone gehören Schwankungen von 25° nicht zu den Seltenheiten und bei Jakutsk wurden — 48° R. und + 27° R. beobachtet[1]). In der Wüste aber bilden derartige Differenzen die Regel. Die Trockenheit der Atmosphäre, der Mangel von Humus, die Abwesenheit einer geschlossenen Pflanzendecke bedingen, dass die Temperaturunterschiede nicht vermittelt werden und sich mit gesteigerter Kraft auch auf den entblösten Felsboden übertragen.

»C'est pendant l'hiver que du jour à la nuit ces variations atteignent leur maximum; il m'est arrivé plus d'une fois de voir, sous le 17 parallèl et au mois de janvier, le thermomètre ne marquer au lever du soleil que + 5° et s'élever à une heure de l'après-midi à + 35°, ayant ainsi varié de 30 degrés en 7 heures[2]).«

Nachtigal beobachtete[3]) in Murzug folgende höchste Temperaturdifferenzen der Luft:

1) Dove, Zeitschrift für allgem. Erdkunde. Berlin 1856, p. 568.
2) de Lauture, Le désert et le Soudan. Paris 1853, p. 20.
3) Sahara und Sudan. I, p. 136.

Digitized by Google

April 1869	18,1°	Januar 1870	20,2°
Mai	16,8°	Februar	20,4°
October	13,0°	März	21,2°
November	12,0°		
December	22,2°		

Trotz dieser starken Unterschiede fehlt dort der Thau fast ganz.

LAUTURE berichtet uns zugleich, dass im Sommer die Luft Nachts 35° und Tags 48° erreichte, also in wesentlich engeren Grenzen schwankte. ROHLFS schreibt im April 1874 [1]: »Wir hatten im Februar fast täglich morgens vor Sonnenaufgang eine Temperatur unter 0°, ja am 16. Februar konnten wir die grösste Kälte beobachten, welche überhaupt je in der Sahara notiert worden ist; das Minimumthermometer zeigte — 5° C.«

Ich selbst habe im März, April und Mai folgende Temperaturen in Celsiusgraden (Schleuderthermometer) beobachtet:

		Morgens	Mittags	Abends
März	18.	—	28°	28°
	19.	15,5°	28,5°	—
	20.	15,5°	25°	—
	21.	13°	31°	—
	22.	17°	28,5°	—
	23.	—	24°	—
	24.	18°	25°	20°
	25.	12°	23°	30°
	26.	16°	30°	—
	—	—	—	—
	29.	21°	22°	—
April	1.	—	25°	—
	2.	—	36°	—
	3.	—	32°	—
	5.	26°	31°	26°
	6.	20°	—	23°
	7.	17°	25°	—
	—	—	—	—

1) Brief an PETERMANN in Besitz von Herrn Hofrath PERTHES.

Digitized by Google

		Morgens	Mittags	Abends
April	16.	21°	35°	27°
	17.	—	30°	—
	18.	29°	35°	—
Mai	7.	16°	—	34°
	8.	—	42°	—

(Die Beobachtungszeiten entsprechen sich nicht genau, da ich die Temperaturen nur zum Behuf barometrischer Correcturen beobachtete.)

»Die Temperatur des Wüstensandes im Vergleich mit derjenigen der Luft giebt ein Bild von den Wärmeausstrahlungsverhältnissen. In Regenfeld beobachteten wir, dass Morgens bei Sonnenaufgang Luft und Sand nahezu 5° C. warm sind. Die Luft geht bis gegen Mittag dem Sande um 1—2° voran, dann steigt aber das Maximum der Sandwärme (26°) weit über das der Luftwärme (22°) etwa um 3 Uhr, der Sand bleibt wärmer als die Luft um Mitternacht noch gegen 1—2°, bis gegen Morgen beide gleich werden«[1]. Rohlfs[2]) beobachtete am 3. Mai 1865 in der Sonne 74° C., im Schatten 43° C., im Sand 63° C.; Duveyrier fand[3]) am 22. Januar 1860 den Sand — 4,75°, und am 20. Juli desselben Jahres + 66,4°, also eine Maximaldifferenz von 70° C.

Endlich möchte ich hier noch einer interessanten Beobachtung aus der südlichen californischen Wüste von Lt. Wheeler[4]) gedenken, welcher schreibt: »Die Temperatur des Wüstensandes steigt meist beträchtlich über die der Luft, wobei natürlich die Farbe desselben von Einfluss ist. Bei Nacht nimmt die Oberfläche die Temperatur der Luft an, während in der Tiefe die Wärme blos sehr allmählich abnimmt. Ich fand eines Morgens bei einer Lufttemperatur von 22° C. den sandigen Boden in 1 Fuss Tiefe noch 35° C. heiss.«

Die eben erwähnte Farbe des Gesteines spielt für die Erwärmung desselben natürlich eine ganz hervorragende Rolle, die im Abschnitt »Die Bildung des Wüstensandes« noch eingehend gewürdigt werden soll. Hier mag aber noch erwähnt werden, dass selbst weisse Ge-

1) Jordan, Zeitschrift f. Vermessungskunde. Karlsruhe 1874, p. 384.

2) Petermann's Ergänzungshefte Bd. 25, p. 25.

3) Duveyrier, Die nördliche centrale Sahara. Petermann's Mitth. Bd. 9, p. 379.

4) Wheeler, Petermann's Mitth. Bd. 22, p. 413.

Digitized by Google

steine durch die Wüstensonne stark erwärmt werden. Ich habe im Uâdi Ssannûr eine weisse Auster nicht in der Hand zu halten vermocht, um sie mit dem Hammer aus dem Gestein zu isolieren, und die armen Beduinen, welche ihre Halicore-Sandalen wie einen Schatz hüten, den sie nur auf felsigem Boden zum Schutz der Füsse tragen, ziehen während der Mittagshitze ihre Sandalen an, da selbst weisser Sand so erwärmt wird, dass sie darunter leiden. Dunkle Gesteine kann man während der Mittagszeit unmöglich in die Hand nehmen. Diese starke Erhitzung der Gesteine wird bei Behandlung der »schwarzen Schutzrinde« in Rücksicht gezogen werden.

Eine directe Folge der Insolation ist das schalige Abblättern der Gesteine. Bei gewissen homogenen Kalken von muscheligem Bruch (s. Fig. 1), dann aber auch bei Granit beobachtete ich häufig, dass die Blöcke von concentrisch blätterigen Schalen umgeben sind, welche beim leichtesten Hammerschlag abfallen. Bei Granit sind solche Schalen 5—15 mm dick, bei dichten Kalken dagegen sind die einzelnen Schalenblätter kaum einen Millimeter dick, und 15—20 solcher dünner Blätter übereinander gelegt bilden die leicht abblätternde Aussenseite des Blockes. Taf. III Fig. 4 bringt ein Stück festen Kalkes zur Darstellung, dessen Aussenseite durch parallele Sprünge in einzelne dünne Schalenblätter zerlegt wird (Unterseite der Figur), eine Desquamationserscheinung, welche sehr häufig ist, aber nur selten in einem Handstück zur Darstellung gelangt, weil die Schalen überaus leicht abfallen. Das Stück stammt vom Uâdi Omm Ruthi auf der südlichen Galâla. Gewöhnlich fallen beim ersten Hammerschlag die lockeren Blätter klirrend zu Boden, und selbst wenn man sie mit dem Messer vorsichtig abzulösen versucht, bleiben sie nicht in Zusammenhang. Diese Schalen

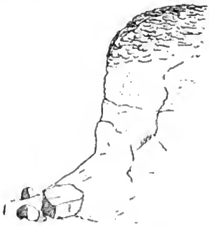


Fig. 1. Desquamation eines Kalkfelsens im Uâdi Dugla (s. Anmerkung [1])).

1) Die Zinkographien im Text sind vom Autor selbst gezeichnet und zwar, mit Ausnahme weniger, näher bezeichneter, Copien, nach der Natur. Die Reproduction derselben führte E. A. Funke, die der Vollbilder und Lichtdrucktafeln J. Klinkhardt in Leipzig aus.

Digitized by Google

sind zwar auf ihren Spalten mit zersetztem Verwitterungspulver bedeckt, allein jedes einzelne Blatt ist auf dem Querbruch frisch, so dass es nicht möglich ist, der chemischen Verwitterung diese Wirkung zuzuschreiben. Da vielmehr gerade die der Sonne ausgesetzten Flächen solche Desquamation [1]) zeigen, so müssen wir annehmen, dass die Insolation von wesentlichem Einfluss ist, und es scheint mir folgende Erklärung der Wahrheit nahe zu kommen. Die Erfahrungen, die man bei dem Messen der Sandtemperatur gemacht hat, scheinen mir auch auf die Temperaturveränderungen der Gesteine ihre Anwendung finden zu dürfen. Wir sahen oben, dass der Sand am Tag auf grosse Tiefe erwärmt, Nachts aber nur in geringer Schicht wieder abgekühlt wird. Mögen die Buchstaben *A* bis *D* je einigen Millimetern Gesteinsdicke von aussen nach innen entsprechen, so werden nach Analogie der Sanderwärmung die Schichten *A. B. C. D* während des Tages auf 30° C. erwärmt, und während *A* und *B* in der Nacht bis zum Morgen ihre Wärme durch Ausstrahlung verlieren, behalten die Schichten *C* und *D* ihre Wärme bei. Inzwischen beginnt wiederum die Sonnenwärme auf den Felsblock einzuwirken, und erhöht die Temperatur der beiden äussersten Schichten *A. B.* Die Schichten *C* und *D* sind noch vom vorhergehenden Tag erwärmt, es wird also der Temperaturwechsel, und in Folge dessen die physikalische Ausdehnung und Zusammenziehung nur in einer bestimmten, oberflächlichen Schicht wirksam sein. Die Folge davon ist, dass durch die häufig wiederholte Ausdehnung und Zusammenziehung der Schichten *A* und *B*, gegenüber den gleichmässig warm bleibenden Schichten *C. D*, zwischen *B* und *C* allmählich eine Lockerung des Gesteins eintritt, die sich endlich in einer wirklichen Zerreissung äussert. Das Wärmeleitungsvermögen des Gesteins würde die verschiedene Dicke der abspringenden Schalen bedingen. Dass die abschuppenden Blätter der Oberflächengestalt des Felsblockes immer annähernd parallel abgesprungen sind, scheint mir auch ein Beweis für vorstehende Erklärung.

In unseren Breiten werden die Granitfelsen nur durch jene grossen polygonalen Sprünge in einzelne Blöcke zerlegt, die dann

1) F. VON RICHTHOFEN, Führer für Forschungsreisende p. 94, fasst diesen Begriff weiter, als es hier geschehen ist.

Digitized by Google

später durch Verwitterung abgerundet werden. Auch der Sinaigranit zeigt häufig jene groben Spalten, welche den Felsen in einen Haufen Blöcke zerlegen. Die einzelnen Blöcke werden dann bisweilen nach dem eben geschilderten Typus durch Desquamation in concentrische Rindenstücke zerlegt, und solche Felsen sehen dann aus wie ein Haufen Kohlköpfe; ein ganz ausgezeichnetes Beispiel dieses Vorkommens bietet die isolierte Granithügelgruppe el Masraîje in der südlichen Sinaiküstenebene. Aus dem Sand und Kies der vom Meer langsam

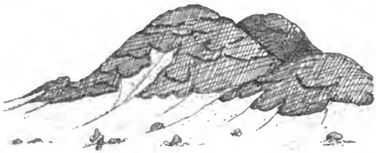


Fig. 2. Granithügel el Masraije in der südlichen Sinaiwüste.

ansteigenden Ebene ragt s. Fig. 2 eine phantastisch gestaltete dunkelrothe Granithügelkuppe hervor und besteht zum grösseren Theil aus solchen schalig zersprungenen, kohlkopfähnlichen Granitblöcken, wie beifolgende Zeichnung s. Fig. 3 darstellt. Ich werde auf die Zersetzung

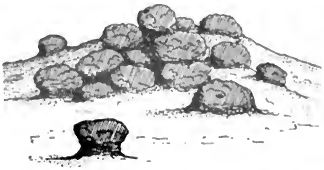


Fig. 3. Zerbröckelnde Granitblöcke am el Masraije.

dieses Granites bei Besprechung des Wüstensandes noch zurückkommen. Die Feldspäthe waren roth und unzersetzt und zeigten an, dass die chemische Verwitterung an dieser Bildung keinen Antheil hat, nur in den concentrischen Spalten befand sich eine dünne Schicht feuchten Thonstaubes und lehrte, dass hier im Schatten auch chemische Verwitterung vor sich gehe.

Haben sich die concentrischen Schalensprünge zu bilden

Digitized by Google

begonnen, dann werden sie durch chemische Verwitterung erweitert und vergrössert, wie solches im folgenden Abschnitt ausgeführt werden soll. Hat sich auf einem Gestein die schwarze Schutzrinde (s. u.) gebildet, dann scheint dasselbe gegen Desquamation gesichert zu sein.

Von dem soeben geschilderten Vorgang der peripherisch concentrischen Abschuppung möchte ich die Bildung radial ins Innere eines Gesteines eindringender Spalten unterscheiden. Während die erstere Erscheinung bei gewissen Gesteinen nur sofern sie in grossen Blöcken auftreten ziemlich häufig ist, bilden sich bei kleineren Steinen radiale Sprünge, welche mehr oder minder tief in die Felsmasse eindringen und dadurch eine Zerkleinerung derselben herbeiführen. Bei Besprechung der »Kieswüste« werden wir diesen Vorgang eingehend berücksichtigen. Hier können wir nur feststellen, dass die Wirkung der Temperaturunterschiede als Denudationsprocess in der Wüste sehr bedeutsam ist und die Vorgänge der chemischen Verwitterung an Intensität wesentlich übertrifft.

Eine sehr eigenthümliche und in ihren Folgen sehr wichtige Wirkungsart der Insolation findet dann statt, wenn der Sonne nicht einfarbige sondern polychrome Gesteine unterworfen sind, Gesteine, die aus verschieden gefärbten Gemengtheilen zusammengesetzt sind. Hierher rechne ich die grosse Reihe der grob-krystallinischen Gesteine: Granit, Gneiss, Glimmerschiefer und ähnliche. Die ohne glasiges Bindemittel diese Gesteine zusammensetzenden verschiedenen Mineralien sind von verschiedener Dichte, verschiedener Farbe und verschiedener specifischer Wärme. Infolge dessen werden bei Erwärmung die einzelnen Mineralien verschieden stark erhitzt und verschieden stark ausgedehnt, bei Abkühlung strahlen sie ihre Wärme verschieden rasch ab und ziehen sich mit verschiedener Intensität wieder zusammen. Indem sich dieser Vorgang täglich aufs Neue vollzieht, werden die einzelnen Mineralien des krystallinischen Gesteins gegeneinander gelockert und fallen schliesslich vollkommen auseinander.

Dieser Vorgang, der in dem Abschnitt über Bildung des Wüstensandes noch eingehend behandelt werden soll, gehört zu den wichtigsten und typischsten Vorgängen, die man in der Wüste beobachten kann.

Digitized by Google

3. Verwitterung.

Wenn wir unter Verwitterung nicht jeden beliebigen Zerstörungsprocess eines Gesteines, sondern nur einen solchen Zersetzungsvorgang verstehen, der unter dem Einfluss und der Mitwirkung chemisch thätigen Wassers sich vollzieht, so ist es begreiflich, dass diese eigentliche Verwitterung in der Wüste nur eine geringe Rolle spielen kann. Da chemische Verwitterung von der Anwesenheit des Wassers abhängig ist, so kann sie natürlich nur da stattfinden, wo Wasser hingelangt. Aber in der Wüste wird durch die warme trockene Luft und die Wärme der Sonne rasch der gefallene Thau oder Regen wieder abgetrocknet; die Stellen nun, welche am schwersten abgetrocknet werden, haben begreiflicherweise am meisten von der Verwitterung zu leiden. Schattige Wände, die Unterseite von Felsblöcken, vorhandene Hohlräume, Spalten im Gestein, das sind die Stellen, an welchen in der Wüste Verwitterung stattfindet und wo man ihre Spuren leicht entdecken kann. Die Oberflächenformen, welche durch Verwitterung in der Wüste erzeugt werden, sind oft sehr sonderbarer Art.

Zum Studium der Verwitterung an beschatteten Wandflächen eignen sich besonders die Inschriften, welche seit Jahrhunderten von Reisenden an den Felswänden der Sinaigebirge eingeritzt worden sind. Wenn wir absehen von den hieroglyphischen Inschriften, welche gelegentlich vorkommen und meist sorgfältig und tief in frisch geglättete Granitwände eingegraben worden sind, so treten uns als älteste Urkunden die sogenannten Nabatäischen Inschriften s. Fig. 4 entgegen, welche in den ersten Jahrhunderten unserer Zeitrechnung von wandernden Kaufleuten und Pilgern eingeritzt worden sind. Die Wände des Nubischen Sandsteines im Uâdi Mokátteb sind vollkommen bedeckt mit jenen sonderbaren Schriftzeichen; sie finden sich wieder am Djebel Nakûs nördlich von Tôr und an verschiedenen anderen Orten. Alle diese nabatäischen Inschriften sind in Sandsteinfelsen eingekratzt, welche der Sonne ausgesetzt und demzufolge (s. u.) mit einer schwarzen

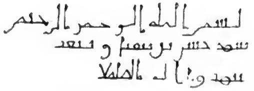


Fig. 4. Nabatäische Inschrift am Dj. Nakûs.

Schutzrinde bedeckt sind. Ich werde noch zu zeigen haben, wie die Gesteine durch diese schwarze Schutzrinde resistent und widerstandsfähig gegen die Wüstenkräfte werden; so erklärt es sich, dass diese 1500 Jahre alten Inschriften ausgezeichnet erhalten und meist vollkommen unverwittert geblieben sind.

Neuere Reisende haben ihre Namen, besonders am Dj. Nakûs vielfach auch eingegraben, theilweise gleich den Nabatäern auf exponierte Felswände, theilweise an den schattigen Stellen, wo sie lagerten. So ist besonders eine enge Schlucht am Dj. Nakûs mit Inschriften aus allen Jahrhunderten versehen. Araber, Griechen, Lateiner, Engländer, Franzosen, Deutsche haben sich hier verewigt und ihre Inschriften mit der Jahreszahl datiert. Hier aber lässt sich beobachten, dass die Inschriften an den schattigsten Stellen der Schlucht viel stärker, häufig bis zur Unleserlichkeit verwittert sind, während ältere Inschriften auf sonnigeren Wänden noch wohl erhalten sind. Eine Inschrift vom Jahre 1764 ist sehr verwittert, eine andere »Kosath 1779« wohl erhalten. H. G. KNIGHT 1811 und J. A. F. Azakerley 1811 sind deutlich lesbar, J. S. Grive und J. Smith 1832 stark abgewittert. Wenn es auch in einzelnen Fällen zugegeben werden kann, dass die Schriftzeichen verschieden tief in den Felsen eingegraben waren, so ist doch überaus auffallend, dass im Durchschnitt die 1500 Jahre alten Inschriften der besonnten Wände viel besser erhalten sind, als die viel tiefer eingegrabenen dieses Jahrhunderts, welche auf schattigen Felswänden stehen. Diese Erscheinung aber erklärt sich ungezwungen, wenn wir berücksichtigen, dass in der Wüste an schattigen Stellen Verwitterung stattfindet, welche an besonnten Flächen fehlt.

In der südlichen Sinaihalbinsel finden sich als liegende Gesteine hauptsächlich ein rother Stockgranit, und darüber ein grauer Lagergranit. Während der erstere der Verwitterung ziemlich grossen Widerstand zu leisten scheint, zeigt der graue Lagergranit die deutlichsten Spuren chemischer Verwitterung s. Fig. 6. Diese Verwitterung zeigt sich in Gestalt vieler rundlicher Löcher von Nuss- bis Kopfgrösse und darüber, welche 10—50 cm tief in das Gestein hineindringen und s i c h n a c h i n n e n h ä u f i g s o g a r e r w e i t e r n, s. Fig. 5. Wenn man auch an geeigneten Stellen beobachten kann, dass diese Löcher der Bankung des Granites parallel laufen s. Fig. 6, dass sie also theilweise durch

Digitized by Google

die Structur des Gesteins veranlasst sind, so ist ihre eigentliche Bildung doch eine Wirkung der Verwitterung. Wo irgend eine schattige Vertiefung am Felsen war, da wurde der Regen, der Thau, die Bergfeuchtigkeit weniger rasch abgetrocknet, und es begann eine chemische Zersetzung des Feldspathes. Der Wüstenwind blies die verwitterten Krusten leicht ab und half mit seinem Sandgebläse die Vertiefung zu einem Loche umzugestalten. Je tiefer das Loch hineingewittert wurde, desto schattiger wurde die Stelle, desto länger hielt sich das Wasser unverdunstet, desto stärker und intensiver

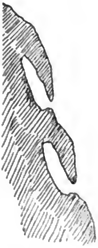


Fig. 5. Durchschnitt durch eine verwitternde Granitwand.

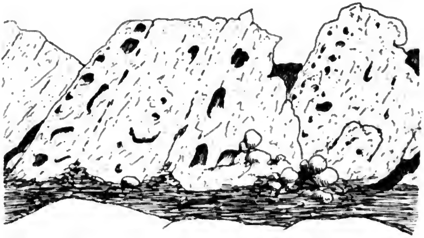


Fig. 6. Granitwand im Uâdi Sleiî mit Verwitterunglöchern.

verwitterte der Felsen. Daher findet man solche Löcher häufig mit engem Eingang und erweiterter Höhle — eine Folge der Verwitterung im Schatten. Und wenn dieser Vorgang sich auch an besonnten Felsflächen findet, so beobachtet man ihn doch auf der W.- und N.-Seite der Felsen am häufigsten. Obenstehende Zeichnung (Fig. 6) giebt eine Westwand des Granites am Uâdi Sleiî wieder, in der Nähe des dort befindlichen Wasserloches, das an einem Porphyrgang zu Tage tritt.

Eine hierher gehörige Erscheinung beobachtete ich in Nordindien. Auf der Fahrt von Aijmir nach Agra durchschneidet die Bahnlinie eine mit Euphorbien bestandene Granitlandschaft, bestehend aus domförmig gewölbten niedrigen Felskuppen, welche ganz wie Rundhöcker abgeschliffen, auf der Nordseite eine eigenthümliche Aushöhlung erkennen liessen. Die Orientierung dieser Hohlkehlen

Digitized by Google

nach Norden und die Nähe der grossen indischen Wüste liessen mich vermuthen, dass diese ausgewitterten Kehlen eine Wüstenerscheinung seien, wie ich sie in den ägyptischen Wüsten öfters beobachtet hatte. Mein Reisegefährte, Prof. F. Exner aus Wien, hatte kurze Zeit vorher hygrometrische Beobachtungen in den Wüstengebieten bei Cairo angestellt und untersuchte auf meine Bitte mit seinem Hygrometer die Feuchtigkeit der Luft, durch die wir fuhren. Es ergab sich, dass die Luft hier die gleich geringe Menge Feuchtigkeit enthielt, wie die Wüstenluft auf dem Mokkatam bei Cairo.

Fig. 7. Einseitig verwitterter Granithügel bei Nana (Nordindien).

Eine ähnliche Erscheinung ist es, wenn der Fuss eines Felsblockes stärker verwittert als die Oberseite und diese daher wie eine Tischplatte über den Fuss herausragt. An der oben genannten Hügelgruppe el Masraîje ebenso wie an dem Granitberg Krên Utûd beobachtete ich solches in schönen Paradigmen. Auch am Schêch Reijah waren Granit-, Kalk- und Sandsteinblöcke in solchen Pilz-Formen ausgewittert. Wie grosse Hutpilze (s. Fig. 8) schauen solche Felsen aus der Wüste heraus und geben derselben ein ungemein originelles Aussehen. Da aber die Bildung der grösseren derartigen Pilzfelsen nur im Zusammenhang mit der Bildung der »schwarzen Schutzrinde« verständlich ist, so werde ich Näheres dort mittheilen, ebenso wie ich die sonderbaren »Säulengallerien« erst dort behandeln kann.

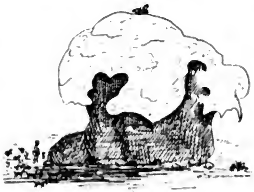


Fig. 8. Kalkfelsen im Uâdi Ashar der südlichen Galâla.

Ragt eine Felsbank mit ihrer unteren Kante, wenn auch nur wenig, über die unter ihr liegende Gesteinsbank, dann findet auch im Gebiet dieses Schattenstreifens chemische Verwitterung statt. Die Felsbank bekommt eine Hohlkehle und ragt mehr und mehr über ihre Unterlage hervor, s. Fig. 9. Hier wie in allen ähnlichen Fällen wird

Digitized by Google

dieser Verwitterungsprocess kräftig unterstützt durch den heftigen Wüstenwind, der jedes abgewitterte Gesteinsstückchen herausbläst und entführt. Aber selbst das Sandgebläse des Wüstenwindes unterstützt und steigert hierbei nur die stille, geheimnissvolle Thätigkeit der Verwitterung im Schatten. Näheres hierüber findet man in dem Kapitel über »Die Formen der Felswüste«.

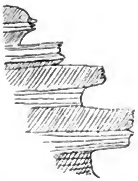


Fig. 9. Überhängende Kalkbänke am Fusse des Dj. Burbäh (Sinai).

Mitten in der Wüste findet man häufig kleine und grössere Felsblöcke, welche vollkommen hohl sind und nur aus einer mehrfach durchbrochenen Rinde bestehen. So oft man auch derartig innen hohle Blöcke von grösseren Dimensionen trifft, so selten sind kleinere Stücke dieser Art, wie sie auf Taf. III in Fig. 5. 6. 7 dargestellt werden. Fig. 7 zeigt ein sehr weit vorgeschrittenes Stadium, da die Rinde oben ganz entfernt ist, und nur noch die Basis und die äussere Wand erhalten blieb. An dem Stück ist zugleich zu erkennen, dass die Aussenseite gebräunt und wenig zersetzt, die Innenseite aber stark angewittert ist. Derartige Stücke haben O. Fraas veranlasst [1], von einer »Verwitterung von innen heraus« zu sprechen. Dass dieser Begriff einen inneren Widerspruch enthält, lässt sich nicht verkennen, obwohl die Thatsache feststeht, dass in der Wüste häufig Felsblöcke aus einer harten Rinde und einem weichen, zerfallenden Kern bestehen. Der Unterschied einer harten Oberfläche und eines weicheren Kerns kann auf zweierlei Art entstehen. Entweder verhärtet die Oberfläche und das Innere behält seine ursprüngliche Consistenz — das ist der Fall bei der Bildung der schwarzen Schutzrinde und wird in dem betreffenden Abschnitt erläutert werden. Oder aber die Atmosphärilien suchen sich einen Weg ins Innere des Felsblockes und zerstören dasselbe, ohne die Oberflächenschicht anzugreifen — das ist der Fall bei der Verwitterung im Schatten. Wenn ein Stein, dessen Masse durch chemische Verwitterung angegriffen werden kann, in der Wüste so liegt, dass nur an einer Stelle chemische Verwitterung darauf einwirken kann, so wird nur diese Stelle zerstört und dann geht der

1) O. Fraas, Aus dem Orient. Stuttgart 1867, p. 200.

Digitized by Google

Verwitterungsprocess im Innern weiter. So entstehen die hohlen Felsblöcke. Aber diese Erscheinung darf nicht zusammengeworfen werden mit der oben genannten, wo durch Bildung einer äusseren härteren Rinde eine Härtedifferenz zwischen Oberfläche und Kern

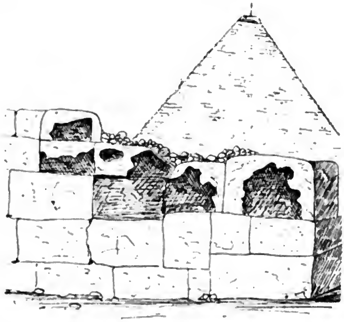


Fig. 10. Verwitterte Mauer an den Pyramiden von Giseh.

erzeugt wird. Beide Erscheinungen können auch an demselben Stück auftreten, allein der Begriff »Verwitterung von innen heraus« darf nicht zu wörtlich aufgefasst werden. Ich komme später auf diese Erscheinung noch zurück.

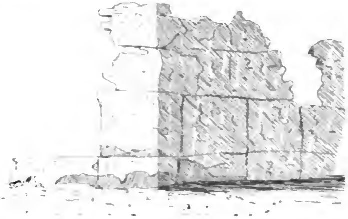


Fig. 11. Verwitterte Mauer an der Menkaura-Pyramide bei Giseh.

Die Bildung hohler Felsblöcke lässt sich sogar in einzelnen Fällen zeitlich bestimmen. Auf der Nordseite der Pyramide bei Giseh befinden sich Mauern s. Fig. 10. 11, deren Zugehörigkeit zum

Digitized by Google

Pyramidenbau aus ihrer Lage leicht ersichtlich ist. Die Quadern dieser Mauern sind theilweise so verwittert, dass das Innere zerbröckelt ist und nur ein 2—4 cm dicker Schalenrand wohl erhalten blieb. Manche der diese Mauern zusammensetzenden Kalkquadern sind so stark angewittert, dass, wie der Querschnitt auf Fig. 12 erkennen lässt, nur eine schmale Platte davon übrig blieb, von der man nicht vermuthen kann, dass sie in dieser Form in die Mauer eingefügt worden sei. Allein viel schöner und instructiver ist eine Mauer, welche im Uâdi Guerrâui durch SCHWEINFURTH entdeckt wurde. In dem genannten Thal, etwa 8 km östlich von dem Bad Heluân bei Cairo, sind Alabastergänge im Nummulitenkalk, welche, wie es scheint, beim Bau der Pyramiden ausgebeutet worden sind, denn ein erhabener Fahrdamm lässt sich noch heute vom Ausgang des Thales in directer Richtung auf Giseh zu verfolgen. Massen von Thonscherben liegen in der Nähe der Alabastergruben verstreut, Fundamente von Wohnhäusern lassen sich erkennen, und unterhalb der

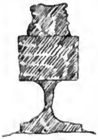


Fig. 12. Durchschnitt einer Mauer an den Pyramiden von Giseh.

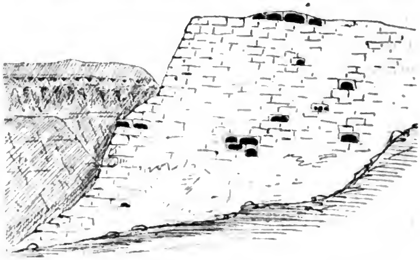


Fig. 13. Sperrmauer im Uâdi Guerrâui bei Heluân.

Gruben hat man das Thal durch eine 10 m hohe Mauer quer abgeschlossen s. Fig. 13. Die Vermuthung liegt nahe, dass diese Mauer den Zweck hatte, periodisch fallendes Regenwasser aufzustauen und zu sammeln, um auf diese Weise den kostspieligen Wassertransport vom Nil nach den Gruben zu ersparen — genau

Digitized by Google

wie man im Alterthum längs der Cyrenaika[1]) es sich angelegen sein liess, überall das selten fallende Regenwasser zu sammeln und in Teichen für die trockene Zeit aufzubewahren.

Der Fangdamm im Uâdi Guerrâui ist allerdings selbst später von den Wasserfluthen zerstört worden, so dass nur auf beiden Thalhängen die Reste der Mauer zu sehen sind, aber diese Reste haben dadurch ein besonderes Interesse, dass die 2 Kubikfuss grossen Kalkquadern zum Theil (s. Fig. 13) vollkommen hohl sind; von dem Kalkblock ist nur eine 3 cm starke Rinde übrig, das Innere ist herausgewittert.

Da es völlig undenkbar ist, dass die Ägypter schadhafte Steinblöcke zu diesem Bau verwandt haben, da es ebenso unverständlich ist anzunehmen, dass sie einzelne Quadern bis auf eine 3 cm starke Rinde ausgehöhlt hätten, so haben wir hier den sprechenden Beweis dafür, dass diese Steine seit dem Pyramidenbau, also in ungefähr 5000 Jahren ausgewittert sind; und da nur ein Theil der Blöcke so ausgewittert ist, so erkennen wir, dass jener Zeitraum das Minimum von Zeit darstellt, in der sich eine solche Erscheinung vollziehen kann. Ich besitze ein solches Stück Rinde in meiner Sammlung, an dem deutlich zu erkennen ist, dass wesentlich die Innenseite der chemischen Verwitterung unterlegen ist, während die Aussenseite den Charakter der in der Wüste durch Sand zerstörten Kalke zeigt.

Blicken wir auf das zurück, was wir über die Thätigkeit der chemischen Verwitterung in der Wüste feststellen konnten, so finden wir: die chemische Verwitterung ist in der Wüste gering und wirkt nur im Laufe langer Jahrtausende. Sie findet überall da statt, wo Gesteinsflächen beschattet sind, und deshalb die Feuchtigkeit länger wirken kann als auf besonnten Flächen. Zu einer Verwitterung auf grösseren Flächen kommt es in der Wüste nicht, sie bildet immer eine locale Erscheinung.

---

1) G. Schweinfurth, Una Visita al Porto di Tobruc. L'Esploratore. Milano 1883, VII. Fasc. VI, p. 207.

Digitized by Google

4. Pflanzenwuchs.

In der gemässigten Zone und im Tropenlande gehört nackter Erdboden zu den seltensten Erscheinungen; Alles wird überzogen von einer geschlossenen Pflanzendecke, mag dieselbe als Wald, Dschungel, Rasen, Haide, Moosdecke, Steppengras oder Flechtenrinde erscheinen. Und die »cumulative« Verwitterung zu Lehm oder zu Laterit würde unmöglich jene Intensität erreichen und den Felsen bis zu 50 m Tiefe zersetzen können, wenn nicht eine geschlossene Pflanzendecke den Erdboden vor dem Austrocknen schützte. In der Wüste fehlt jene geschlossene Pflanzendecke, es fehlt mithin die regionale Verwitterung, es fehlt die Bildung von Humus. O. Fraas hat zuerst auf dies letztere ungemein wichtige Factum hingewiesen[1]: »Ob es auch Jedem das eigene Nachdenken bald sagen wird, dass sich die Verwitterung der Gesteine unter einem fast regenlosen Himmel nothwendig anders gestalten muss, als in der gemässigten Zone, so wird man doch, weil an europäische Verwitterungsverhältnisse gewöhnt, über eine und andere Erscheinung betroffen, die uns Abendländern ganz fremd ist. Hierzu rechne ich vor allem den Mangel an Humus. Weder in den Gärten von Rhoda und Schubra, noch in den Palmenhainen des Feirâns, weder in der Ebene Saron noch auf den Bergen Juda's ist auch nur eine Spur jener schwarzen mulmigen Erde, die vorzugsweise aus den modernden Pflanzenresten, oder aus animalischen Aschen besteht und erst in Folge der Cultur sich mit den mineralischen Bestandtheilen des Bodens vermengt.« Und wichtig ist es darauf hinzuweisen, dass auch in keiner der jüngeren Ablagerungen fossiler Humus vorkommt. Schweinfurth schrieb mir über diesen Gegenstand: »Es ist eine ungemein auffallende Erscheinung, dass sogar die Nilerde kaum Spuren von Humus enthält. Humus kann sich nur bilden unter Wasser oder unter Schnee bei verlangsamter Zersetzung. Die Abwesenheit von Humus kann also als einer der zahlreichen Beweise für die Beständigkeit des Wüstenklimas innerhalb der geschichtlichen Periode angeführt werden. In der That habe ich in den Wüsten Ägyptens nirgends alte Humus-Lager, Spuren oder Streifen zwischen den Thon-

1) O. Fraas, Aus dem Orient, p. 196.

Digitized by Google

und Sandlagen gefunden, die als Zeugen ehemaliger Thalsohlen heute hoch an den Thalwänden kleben geblieben sind. Dagegen sieht man die eingelagerten Nilthonlagen am Rande des Nilthals sehr

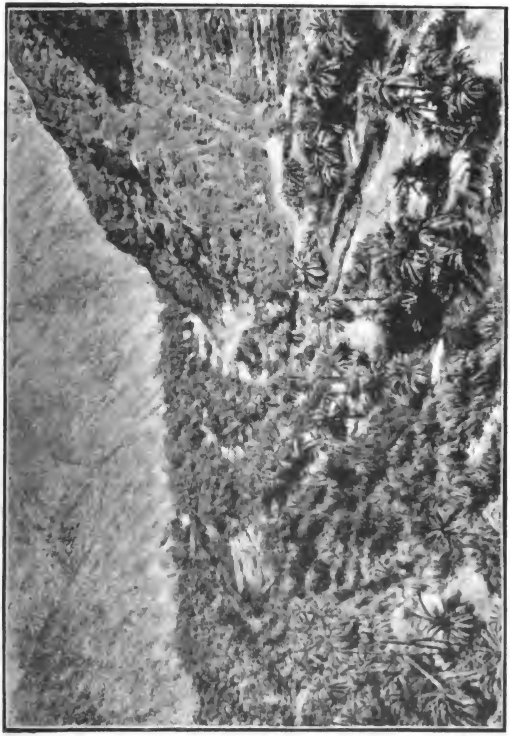


Fig. 14. Palmenhaine im Uâdi Feirân.
Photographiert durch Dr. Sarasin (s. Anm. 1).

deutlich.« Mit dem Mangel einer geschlossenen Vegetationsdecke, mit der Abwesenheit einer Humusschicht fehlen auch der Wüste alle

1) Ich verdanke diese und einige weitere Vollbilder der Liebenswürdigkeit der Herren Dr. Dr. Sarasin zu Berlin.

Digitized by Google

die Erscheinungen, welche bei uns eine Folge jener sind, und in erster Linie die regionale und cumulative[1]) Verwitterung.

Die Pflanzen in der Wüste leben fast durchgängig auf Schuttland, sei es auf einem Schuttkegel am Fuss einer Felswand wo etwas Wasser hervorsickert, sei es im Schutt, der die Sohle der Thäler (Uâdi) erfüllt, und selbst in den Oasen ist das Pflanzenleben nur im Umkreis der Brunnen einigermassen dicht und zusammengedrängt. Wo in der Oase Feirân die Quelle entspringt, da beginnen die Palmenhaine s. Fig. 14, und wo das Bächlein nach einstündigem Lauf im Thalschotter versiegt, da enden auch die Pflanzen.

»Pflanzenwuchs[2]) findet sich in der Wüste während des grössten Theils des Jahres vorzüglich nur in den Thälern, den Wadi's. Schauen wir von einem höheren Kamme hinab in die umgebende Landschaft, so sehen wir, wie genau den in der Regenzeit gebildeten Wasserrinnen folgend sich von den Abhängen schmale grüne, oft kaum handbreite Linien hinunterziehen, überall weite, absolut nackte Flächen zwischen sich lassend, in breiteren und tieferen Furchen zusammenfliessen und schliesslich am Fusse in das Hauptthal ausmünden. Die Sohle dieses, die gewöhnlich streckenweise eben und breit wie eine Strasse, aber in Schlangenwindungen längs des Kammes weiterläuft, erscheint am Rande, da wo die fast senkrecht aufsteigenden Felswände Morgens und Abends einen flüchtigen Schattenstreifen werfen, von einer fortlaufenden Hecke gesäumt, in der ganzen Breite aber mit einem grünen Maschenwerk bedeckt. Der Anblick ist ähnlich dem, welchen das Staudenstück unserer botanischen Gärten gewährt. Wie dort die Hand des Gärtners die Pflanzen in isolierte Gruppen bringt, zwischen ihnen durch Ausjäten des Unkrautes kahle Stellen schafft, so steht hier Busch neben Busch, einer vom anderen, wenn auch in durchaus keiner Regelmässigkeit des Abstandes durch kantige Steinblöcke, durch nacktes, kiesiges Geröll getrennt.«

Allerdings kann es vorkommen, dass man im Frühjahr in ein Wüstenthal gelangt, in welchem alles blüht und duftet, in dem rothblühende Erodien das Auge entzücken oder wo die Artemisia judaica mit ihrem aromatischen Geruch die Luft so erfüllt, dass man das

1) RICHTHOFEN, Führer für Forschungsreisende, p. 112.

2) VOLKENS, Die Flora der ägyptisch-arab. Wüste. Berlin 1887, p. 17.

Digitized by Google

Uâdi schon einige Kilometer weit riecht, bevor man es betritt; allein auch hier findet man nur isolierte Büsche, nie eine geschlossene Decke von Pflanzen. An der südlichen Galâla beginnen die Pflanzen in 800 m Höhe zahlreicher zu werden, die Gehänge sind mit Gestrüpp bewachsen und auf der Höhe des meilenweiten Plateaus glaubt man sich der Wüste entrückt. Der eocäne Kalk, in mächtigen Platten abgesondert, erinnert an eine Dachsteinlandschaft, aber als wesentlicher Unterschied fällt sofort der Mangel von Rasendecken, von Flechtenrinden, von Karrenfeldern und anderen nordischen Erscheinungen auf. Ausgeblasene hohle Kalkblöcke, gebräunte Rinden auf den Felsen, lassen den Wüstencharakter sofort erkennen.

Es kann auch vorkommen, dass durch einen einzigen starken Regen eine vorher sterile Fläche in kürzester Frist sich mit Pflanzen bedeckt, dass Diplotaxis acris, Anastatica hierochondica oder (die echte Rose von Jericho) Asteriscus pygmaeus überall keimen und binnen kurzer Zeit zu blühen beginnen, allein auch hier sehen wir nie die Pflanzen einander so genähert, so gehäuft, wie in unserem Klima.

Local ist demzufolge auch der Einfluss der Pflanzen auf die Bodengestaltung in der Wüste[1]). Die auffallendste, durch Pflanzen bedingte Erscheinung ist die Bildung der Neulinge.

»Die Wüstenpflanzen wirken, wie jeder hervorragende Gegenstand, auch auf steinigem Boden, als Sandfänger und umgeben sich mit einem, in der Richtung des zuletzt herrschenden Windes verlängerten Sandhaufen, der sie allmählich verschütten würde, falls sie nicht die Fähigkeit besässen, sich aus dem Sand hervorzuarbeiten. Durch diesen Vorgang erhöhen sich diese Sandhügel immer mehr, am meisten bei der Tamariske, deren oft 3—5 m erreichenden Hügel als Neulinge der

Fig. 15. Neulinge in der südlichen Sinaihalbinsel.

1) Vgl. Klunzinger, Die Vegetation der egyptisch-arabischen Wüste bei Koseir. Berlin 1878.

Wüstengeographen, mit den Zeugen, denen sie von weitem oft gleichen, wetteifernd eine Rolle in der Physiognomie der Wüstenlandschaft spielen [1]).«

»Die ganze Gegend von Bir Beránin im südlichen Fesan zeichnet sich durch Neulinge, oder Hügel aus, die sich durch Anhäufung von Sand mit vegetabilischen Stoffen gebildet haben. Gewöhnlich giebt der Ethel oder die Tamariske die Veranlassung zu solchen vereinzelten, meist conischen Hügeln, die oft die Höhe von 20—30' erreichen, und auf den meisten sieht man auch noch einen Ethelbusch. Sie geben der Gegend ein höchst eigenthümliches Aussehen, und man findet sie in der ganzen Sahara. Man muss sie indessen wohl unterscheiden von den Zeugen (Témoins), die zwar dasselbe Aussehen haben, doch wesentlich anderer Entstehung sind [2]).«

»Im Uâdi-ben-Auëgir in Tripolis wachsen zahlreiche Sträucher von Calligonum comosum auf niedrigen Lehmhügeln und schützen durch ihre tief eindringenden Wurzeln das lose Erdreich gegen den Wind, der sonst den zerfallenden Lehm über die Dünen streuen würde; auch verleiht dieses Netz von Wurzeln dem Boden eine gewisse Festigkeit durch Conservierung des Wassers. Oft sieht man in der Wüste solche Hügel in Zerfall, wenn der schützende Strauch abgestorben ist, und nur mehr verdorrte Wurzeln das Erdreich durchziehen. Der Wind legt dann in kurzer Zeit die Basis des Hügels blos [3]).«

Diese Neulinge sind eine ungemein häufige Erscheinung in den Thälern der Sinaiwüste, wo man sie von allen Dimensionen beobachten kann, entstehende, fertige und absterbende nebeneinander, wie umstehende Fig. 15 aus der Gaâwüste nahe Schêch Reijah erkennen lässt.

Aber nicht nur Tamariskenbüsche, auch der ginsterähnliche Retam, Grasbüschel und ähnliche stockbildende Pflanzen geben Anlass zur Bildung von Neulingen. »Eine besondere Erscheinung bietet die Küstendüne bei Tôr. Ziemlich flach aus dem Meere tretend, bildet sie einen schmalen, bis zu der etwas erhöhter gelegenen Sandwüste kaum eine Viertelstunde breiten Saum, der mit

1) ASCHERSON, Verh. des Vereins für Erdkunde zu Berlin. 1875, p. 178.

2) ROHLFS, Petermanns Ergänzungshefte. Bd. 25, p. 12.

3) VON BARY, Zeitschrift das Vereins für Erdkunde. Berlin 1876, p. 166.

Digitized by Google

den gewöhnlichen strauchigen Meeresstrandpflanzen besetzt ist, zwischen denen sich der Sand ablagert, so dass sie kleine, einzelne Hügel mehr oder weniger dicht stehend bilden, die bis zwei Klafter im Durchmesser und bis 9′ hoch sind. Sie kehren die bebuschte Seite dem hier herrschenden N.W.-Winde zu, so dass man, wenn man nach SO. schaut, vollkommen grüne Büsche und nichts vom Sande sieht, entgegengesetzt aber nur Haufen Sandes, über welche der grüne Saum des Gesträuches wenig hinausragt [1]).«

Ich bin mehrere Male durch diese Hügelregion gewandert und kann der treffenden Schilderung Frauenfeld's nichts hinzufügen, als dass ähnliche Lehm- und Sandhügel mit niederem Gestrüpp bewachsen auch fern vom Meere auftreten und die Mannigfaltigkeit der mit dem Namen Neulinge bezeichneten Bildungen vermehren. So sehen wir, dass der Pflanzenwuchs zwar local eine Rolle bei der Bildung der Oberflächenformen in der Wüste spielt, dass aber ausserdem die Thätigkeit der Pflanzen in der Wüste unmerkbar ist.

5. Wind.

»Stürme bilden die charakteristische Signatur des Klimas von Nordtibet und überhaupt aller Wüsteneien des centralen Hochasiens. Ihre Stärke ist eine ganz gewaltige, sie füllen die Luft mit Wolken von Staub und Sand, und fegen zuweilen sogar das kleine Steingerölle mit fort. Ihre zerstörende Wirkung ist im Verein mit den anderen atmosphärischen Einflüssen, den Frösten im Winter und den Regengüssen im Sommer, geeignet, die Configuration der Gelände zu verändern. Im Januar 1873 erlebten wir allein 18 Sturmtage [2]).« Diese Worte Przewalski's lassen sich mit geringen Änderungen auch auf die ägyptischen Wüsten anwenden, denn neben der Insolation und gelegentlichen Sturzregen, wirkt keine Kraft so intensiv und so nachhaltig auf die Wüstengebiete ein, als Wind und Sandgebläse. Ein Sturm, der über ein steiniges Gebiet dahinfegt, ist in zwei Hinsichten denudierend thätig. Erstens entfernt er und nimmt mit sich

1) Frauenfeld, Sitzungsber. d. Wiener Acad. d. Wissensch., math.-physik. Classe 1855 II, p. 71.

2) Przewalski, Petermanns Mittheilungen. Bd. 30, p. 18.

Digitized by Google

Alles das, was von Gesteinsmaterial sich gelockert hat. Jedes durch Insolation, durch Verwitterung, durch Wasser gelockerte Gesteinsfragment wird vom Winde entführt, der Wüstenboden wird immer aufs Neue reingefegt. In unserem Klima, wo eine dichte Pflanzendecke den Boden und seine Verwitterungsrinde bedeckt, hat der Wind nur wenig Gelegenheit die letztere zu bearbeiten; er fegt über den Rasen, biegt die Gipfel der Bäume, aber nur selten gelingt es ihm, den blosen Felsboden zu streifen und dort zu entführen, was sich gelockert hat. Das Transportmittel unseres Klimas ist fliessendes oder gefrorenes Wasser, denn nur dieses vermag die schützende Pflanzendecke abzureissen und auf den Boden zu wirken; und so sehen wir in Europa den Transport gelockerter Felsmassen an die Wasserläufe gebunden. Wo kein Wasser regelmässig fliessen kann, da ist die Wegführung des Gebirgsschuttes gering.

Ganz anders in der Wüste. Hier ist kein Winkel so versteckt, kein Plateau so eben, keine Bergspitze so isoliert, dass nicht der Wind seine denudierende Thätigkeit daran versuchen könnte. In die engsten Gesteinsspalten, die tiefsten Höhlungen dringt der Wüstenwind mit unwiderstehlicher Gewalt hinein, und Alles was gelockert ist wird entführt. Man kann sich in unserem Klima keine Vorstellung von der Wichtigkeit dieses Vorganges in der Wüste machen, er übertrifft meines Erachtens alle übrigen Denudationsprocesse bedeutend an Stärke. Man hat neuerdings das Wort »subaërische Denudation« für diesen Vorgang gebraucht, allein mit Unrecht, denn die englischen Geologen (z. B. WHITAKER, On subaërial denudation on cliffs and escarpements of the Chalk and the lower tertiary beds, Geol. Mag. 1867, Vol. IV, p. 447), welche diesen Begriff eingeführt haben, verstehen darunter: Erosion auf dem Festland durch Süsswasserströme, im Gegensatz zu marinen Brandungserscheinungen.

Östlich vom Bad Heluan erstreckt sich bis zum Fuss der Wüstengebirge eine weite, kiesbedeckte Ebene. Hier wurden künstlich zugehauene Feuersteine entdeckt und von Alterthumsforschern eifrig gesucht. Sie waren eingebettet in einen sandigen Lehm, und von diesem wurde bei jedem stärkeren Wind soviel abgetragen, dass jedesmal neue Artefacte an die Oberfläche gelangten und abgesucht werden konnten.

Ein vortreffliches Beispiel für die Intensität der »äolischen

Digitized by Google

Denudation bietet der arabische Friedhof bei Grûm am Sinai. Dort findet Quarantaine für die Mekkapilger statt, und die daselbst verstorbenen Kranken werden direct vor den Häusern des kleinen Dorfes beerdigt. Nun ist es zwar arabischer Brauch, die Leichen nicht allzutief zu begraben, aber die in weisse Lappen gehüllten, mumificierten Glieder, welche dort aus ihren Gräbern herausragen, zeigen, dass im Verlauf weniger Jahre eine merkliche Abtragung der Salzthonebene stattfindet.

Östlich von Feschen fand Schweinfurth auf einer weiten aus Kalkmergel gebildeten Fläche unzählige 5 cm hohe Echinolampas freiliegend, welche alle durch Wegblasen des umhüllenden Gesteins freigelegt worden waren, und bei Abu Roasch waren Flächen eines sehr festen Kalkes vollkommen bedeckt mit hunderten von Pseudodiadema, welche, etwas härter als das umgebende Gestein, der abtragenden Wirkung des Wüstenwindes Widerstand geleistet hatten (s. Taf. I, Fig. 9). Da sie mit allen ihren kleinen Stachelwarzen vollkommen tadellos erhalten waren, so kann der mit Sand beladene Wind diese Wirkung nicht gehabt haben, Wasser ist nirgends dort geflossen und so bleibt der Wind als abtragendes Medium allein übrig. Auch das auf Taf. V, Fig. 10 abgebildete Stück zeigt eine ähnliche Erscheinung, härtere Schichten ragen 1—2 mm aus dem Gestein heraus; aber ein Vergleich mit dem durch Sand abgeriebenen Stück Taf. IV, Fig. 1 lehrt, dass es nicht das Sandgebläse war, welches diese Modellierung erzeugte; auch von chemischer Verwitterung sind keine Spuren erkennbar, vielmehr ist die Erscheinung wesentlich bedingt durch den Wind, indem die durch tägliche Insolation, nächtliche Verwitterung etc., gelockerten weicheren Stellen vom Wind rasch entführt und dadurch immer neue Angriffspunkte für jene Kräfte geschaffen wurden.

Zwar sieht man überall in der Wüste Spuren des Sandschliffes und bei Besprechung der Kieswüste werden wir charakteristische Beispiele kennen lernen, allein diese Thätigkeit des sandbeladenen Windes, so häufig auch ihre Wirkung beobachtet werden kann, tritt vollkommen in den Hintergrund gegenüber der rein abtragenden Thätigkeit des Windes in der Wüste, ein Vorgang, der wahrscheinlich auch in unserem Klima für gewisse Erscheinungen formgebend sein dürfte. Bei seiner hohen Bedeutung glaube ich, dass es nützlich

Digitized by Google

ist, diesen Denudationsprocess mit einem besonderen Namen zu bezeichnen, und so schlage ich vor, das Wort »Deflation« für die denudierende Thätigkeit bewegter Luft zu gebrauchen[1]). Und zwar verstehe ich darunter nicht so sehr die Zerstörung der Felsoberfläche, als vielmehr die Abhebung und Fortführung der durch Verwitterung, Sandgebläse, Insolation etc. gelockerten Gesteinsfragmente.

Die denudierende Wirkungsweise des Windes ist nun grundverschieden von der des fliessenden Wassers. Das erodierende und transportierende Wasser ist in seiner Thätigkeit gebunden an Niveauunterschiede und wirkt ausschliesslich von Berg zu Thal. Ein abflussloses Gebiet, eine weite Ebene ist für die Erosion ein todter Punkt, ihre Wirksamkeit hört hier auf. Je stärker die Neigung des Gehänges, desto stärker die Erosion und der Transport der erodierten Massen. Ausserdem aber ist die Wirkung der Erosion an die lineare Vertheilung der Wasserläufe gebunden, so dass ein sich verästelndes Thalsystem mit einem gewissen Gefälle gegen das Meer hin, den Typus der Oberflächenformen in einer Erosionslandschaft bestimmt.

Die Deflation, die denudierende Wirkung des Windes ist an solch' ein Schema gar nicht gebunden, und wenn mitten in einer Hochebene ein Gebiet liegt, auf dem das Gestein sich leichter zersetzt als in der Umgebung, so wird in der Wüste an dieser Stelle eine grosse kesselförmige Vertiefung entstehen — das ist eine Erscheinung, die in einer Erosionslandschaft als Denudationsresultat vollkommen undenkbar ist. Nun ist es leicht nachzuweisen und wird im folgenden Abschnitt ausführlich behandelt werden, dass ein grosser Theil der Uâdis ihre Form dem gelegentlich rinnenden Wasser verdanken, allein sie haben doch noch gewisse Eigenthümlichkeiten, die specifische Deflationserscheinungen sind und die man als solche nicht übersehen darf, obwohl sie mit Erosionserscheinungen verknüpft auftreten. Halten wir daran fest, dass die deflatierende Thätigkeit des Wüstenwindes nicht an die durch die Schwerkraft vorgezeichneten Bahnen, noch an die topographische Configuration gebunden ist, dass der Wüstenwind Alles heraushebt und davon trägt, was nicht fest ist. Das Wasser gleicht einem Menschen, der nur

1) Ich verdanke die Mittheilung dieses Wortes Herrn Prof. Ascherson.

Digitized by Google

auf Treppen und durch Thüren ein Haus verlassen kann; der Wind ist ein Gespenst, das hereintritt, wo es ihm beliebt, und auf ungewöhnlichen Wegen das Haus auch wieder verlässt.

Ausser dieser deflatierenden Thätigkeit des Windes übt derselbe, wenn er mit Sand beladen ist, noch eine zweite denudierende Thätigkeit aus, eine Thätigkeit, deren Spuren man zwar in der Wüste überall bemerkt, die man aber doch nicht überschätzen darf, und die ich gering anschlage gegenüber dem eben geschilderten Vorgang. In dem Capitel »Kieswüste« werde ich die Wirkungen des Sandes noch eingehender zu behandeln haben, hier sei nur gesagt, dass der Wüstensand ein feines Reagens auf Festigkeitsunterschiede der Gesteine ist und dass er demzufolge sehr mannigfaltige Oberflächenformen anschleift und erzeugt.

Leider liegen mir keine genauen Messungen der Windintensität in der Wüste vor; doch zeugen die Schilderungen aller Reisenden von der Stärke der Wüstenstürme. Rohlf's schreibt[1]: »Bei Staubwind werden handgrosse Steine über den Sand gerollt. Meist sind es Wirbelwinde; kleinere Windhosen kann man täglich beobachten, sie sehen aus wie eine umgestürzte Rheinweinflasche und zeigen die um sich selbst drehende Bewegung. Grössere Windhosen erreichen eine Höhe von mehreren hundert Fussen und jagen oft mit rasender Geschwindigkeit vorüber. Den stärksten und längsten Orkan erlebte ich östlich von Audjilah im April 1869, er dauerte 4 Tage und Nächte.«

Die Thatsache, dass die Wüstenwinde häufig Wirbelwinde sind, ist für das richtige Verständniss der Deflationswirkung in der Wüste von grosser Bedeutung. Als ich Anfang Mai 1887 durch den Theil des Uâdi Arabah zog, den die Beduinen mit dem bezeichnenden Wort »Gärten des Durstes« benennen, sah ich vier Sandhosen hinter einander über die Ebene ziehen, deren jede wohl 50 m hoch war. Gleich gewundenen Sandsäulen bewegten sie sich langsam über die weite Fläche und trugen sicherlich bedeutende Mengen von Sand davon. Auch in Uâdischluchten kann man nicht selten beobachten, mit welcher Stärke vertical aufsteigende Windströmungen Staub und Sand aus der Thalsohle emportragen.

---

1) Die Sahara oder die Grosse Wüste. Ausland 1872, p. 1112.

Digitized by Google

Diese verticalen Bewegungen von gelockertem Gesteinsmaterial sind ein bedeutsamer Factor bei der Entstehung der Thalkessel und Uâdis in der Wüste und werden bei Besprechung derselben (Abschnitt III) eingehend berücksichtigt werden.

Am 29. Januar 1874 erlebte Jordan[1]) einen 30 Stunden anhaltenden Samum. »Der Sand prasselte in Stössen, die sich ungefähr alle 10 Secunden wiederholten, wie ein Platzregen gegen die Leinwand, welche wie ein feines Sieb wirkte und einen ganz feinen Staub in Menge durchliess. Soweit sich der Himmel ausserhalb der schützenden Decke beobachten liess, zeigte der Himmel eine schwere, graugelbe Färbung, hauptsächlich am Horizont und gegen oben sich abschwächend.«

Über die Wirkung des Windes verdanken wir Czerny[2]) umfassende Zusammenstellungen, auf die ich hier verweise, indem ich noch einige eigene Beobachtungen hinzufüge. Am 4. April 1887 befand ich mich an der Südspitze der Sinaihalbinsel, dem Râs Muhámmed und zwar an einer etwa 2 km breiten Meeresbucht, jenseits deren eine Düne 10 m hoch emporragte. Von dort wurde der Sand mir ins Gesicht geschleudert, er wurde also 2 km weit direct herübergetragen. Auf dem Kamelrücken kann man sich, wenn der Sturm von der Seite kommt, nur dadurch halten, dass man sich nach der Windseite zu setzt. Am 27. April wurde durch einen plötzlichen Sandsturm ein mit eisernen Pflöcken im Boden befestigtes und mit grossen Steinen beschwertes Zelt frei in die Luft gehoben und das andere nur dadurch vor dem gleichen Schicksal bewahrt, dass sich etwa 12 Beduinen eine halbe Stunde lang an die Zeltstricke hielten.

Welche Veränderungen Dünen und Sandflächen durch solche Stürme erleiden, wird in einem späteren Abschnitt mit Beispielen belegt werden.

Fassen wir unsere Betrachtungen jetzt zusammen: Die Wirkung des Windes äussert sich in der Wüste in doppelter Weise. Erstens entführt der Wind überall Alles, was durch Verwitterung, Insolation etc. gelockert ist, und verhindert dadurch, dass sich die Denudationsproducte

1) Jordan, Kölnische Zeitung vom 15. April 1874.

2) F. Czerny, Die Wirkung der Winde auf die Gestaltung der Erde. Petermanns Ergänzungshefte, Bd. 48.

Digitized by Google

cumulativ anhäufen. Zweitens scheuert der mit Sand beladene Wind die Felsen und denudiert dadurch deren Oberfläche. Die erstere dieser beiden Wirkungen, die Deflation, ist der wichtigste Denudationsprocess in der Wüste.

6. Electricität und Ozon.

»L'électricité, assez abondante souvent pour que le moindre frottement dégage des étincelles des vêtements, a bien aussi sa petite action perturbatrice, action inconnue, inappréciable mais qu'on n'oserait nier[1]).« Mit diesen Worten weist DUVEYRIER auf eine noch wenig gewürdigte, aber gewiss nicht unwichtige Kraft in der Wüste hin. Die trockene Luft, wohl auch die innere Reibung der Sandkörner in einem Sandsturm, erzeugen solche Mengen von Electricität, dass man sogar die prickelnden Stiche, die der Sandsturm auf der Haut erzeugt, nicht den Sandkörnern, sondern vielmehr der Electricität des Sandsturmes zugeschrieben hat. Allein nicht nur an Samumtagen, nein selbst an manchem warmen windstillen Tag kann man leicht die Mengen von Electricität beobachten, die die Wüstenluft enthält. Beim Kämmen des Haares habe ich häufig das electrische Knistern gehört, und über das Fell eines jungen Steinbockes, den ich einige Zeit mit mir führte, konnte ich nicht streichen, ohne das Funkenknistern zu vernehmen. »Der Regen war in Murzuq[2]) in den seltenen Fällen seines Vorkommens von electrischen Erscheinungen begleitet. Bei trockenen Winden der südlichen Himmelshälfte besonders konnte man aus den wollenen Decken beim Ausklopfen electrische Funken locken, und oben auf der Terrasse des Hauses den grossen Hund Fräulein Tinne's nicht streicheln, ohne knisternde Funken hervorzurufen.«

Demgemäss ist es auch erklärlich, dass der Ozongehalt der Wüstenluft ein ziemlich bedeutender ist. Wir verdanken ZITTEL eingehende Beobachtungen darüber, welcher schreibt[3]): »Der Ozon-

1) DUVEYRIER, Les Touareg du Nord, p. 39.

2) NACHTIGAL, Sahara und Sudan I, p. 139.

3) Sitzungsberichte der K. Bayr. Academie der Wissensch., math.-physik. Classe 1874, p. 222.

Digitized by Google

gehalt der Wüste entspricht der Nr. 4—7,3 der SCHÖNBEIN'schen Scala; er ist erheblich grösser als im Nilthal und in den Oasen.« Dass dieser hohe Ozongehalt eine Folge der Electricität ist, liegt nahe anzunehmen, und dass dieses Ozon, welches sich in der Wüste so leicht und so häufig bildet, einen grossen Antheil hat an gewissen Zersetzungs- oder Neubildungsprocessen in der Wüste, das ist nicht unwahrscheinlich. Die chemische Verwitterung wird gewiss sehr unterstützt durch den Ozongehalt der Wüstenluft, und dass die Bildung der schwarzen Schutzrinde ebenfalls in einem gewissen Zusammenhang mit dem Ozon der Wüstenluft stehe, soll später behandelt werden. Es genüge hier darauf hinzuweisen, welche geheimnissvollen Kräfte in der Wüste in Thätigkeit kommen, und dass unter diesen die Electricität und der Ozongehalt der Wüstenluft eine Rolle spielt bei den Denudationsvorgängen in der Wüste.

Blicken wir jetzt zurück auf die meteorologischen Factoren, welche in der Wüste wirken, so haben wir als wichtigsten den Wüstenwind zu betrachten, welcher die wesentlichsten Charaktere der Deflationslandschaften bestimmt, der, nicht an bestimmte Bahnen gebunden, überall wirken kann und Tag und Nacht, Jahr aus Jahr ein überall wirkt. Er entführt alles Gesteinsmaterial, welches durch die vier zerstörenden Kräfte, die Insolation, die Erosion, das Sandgebläse und die chemische Verwitterung geschaffen wurde; und nur local ist die Pflanzenwelt imstande, auf kurze Zeit in den Neulingen das lockere Material zusammenzuhalten, das der Wüstenwind entführen möchte.

Ausserdem finden wir die Erosion des rinnenden Wassers zwar selten, aber dann um so intensiver in Thätigkeit. Ein Gewitterguss in der Wüste kann unverhältnissmässig mehr leisten, als in anderen Zonen, weil keine Pflanzendecke und selten eine Schuttdecke den Felsboden verbirgt und schützt. Die Steine in der Wüste liegen locker aufeinander, des ersten Sturzbaches wartend, der sie mühelos abreisst und meilenweit davonschleppt.

Unsere Aufgabe ist es nun, die Thätigkeit dieser verschiedenartigen Kräfte zu belauschen und ihr gemeinsames Wirken in seine Elemente zu zerlegen; denn dadurch, dass so verschiedene Factoren

Digitized by Google

miteinander und durcheinander thätig sind, ergiebt sich ein compliciertes Zusammenspiel, ein Wetteifern heterogener Kämpfer, deren gemeinsames Ziel ist: den Wüstenboden einzuebenen und alle Niveauunterschiede zu vernichten, eine Denudationsfläche zu erzeugen.

II. Charaktere der Wüste.

Jeder Reisende, der die Wüste kennen gelernt hat, beobachtet wie mannigfaltig die topographische Gestaltung und der landschaftliche Charakter der Gegenden ist, welche man als »Wüsten« unter einen Begriff zusammenfasst, und wohl in jeder Wüstenbeschreibung giebt der Autor seinem Erstaunen Ausdruck darüber, wie wenig das landläufige Idealbild einer Wüste der Wirklichkeit entspricht. Statt der erwarteten monotonen sandbedeckten Ebene, findet man 6000 Fuss hohe Gebirge, tiefe Thäler, Hochebenen und Plateauabstürze, und nur gewisse Regionen Innerafrikas und Arabiens sind so unter Sanddünen begraben, dass man keinen anstehenden Felsen sieht.

Die verschiedenen Ausbildungsformen der Wüste können am leichtesten nach den vorwaltenden Oberflächengebilden, den verbreitetsten Sedimenten, in vier Typen getheilt werden, welche wir unterscheiden als:

1. Felswüste,
2. Kieswüste,
3. Sandwüste,
4. Lehmwüste.

Ich lehne mich bei dieser Eintheilung an Duveyrier[1]), F. von Richthofen[2]), A. von Middendorf[3]) und Euting[4]) an; jeder dieser vier Typen hat bestimmte landschaftliche und geologische Eigenschaften, ist charakterisiert durch das Vorwiegen bestimmter geologischer Vorgänge und stellt vom sedimentologischen Standpunkt eine Individualität dar.

1) Les Touareg du Nord. 1864, p. XXIX.

2) China I, p. 16. Führer für Forschungsreisende p. 506.

3) Einblicke in das Ferghanathal, Mém. Acad. Imp. St. Pétersbourg, T. XXIX, No. 1, p. 20 f.

4) Zeitschr. d. Vereins f. Erdkunde. Berlin 1886, p. 265.

Digitized by Google

Es liesse sich vielleicht nur darüber streiten, ob die Sand- und Lehmwüsten einen selbständigen Namen führen dürfen, denn, wie ich in einem späteren Abschnitt noch auszuführen habe, beobachten viele Reisende, dass die Sanddünen meist auf felsigem Boden aufruhen, welcher sogar zwischen den Dünenzügen häufig zu Tage tritt. Wir dürfen daher die Sandwüsten nicht als Sandmeere auffassen, welche bis in grosse Tiefe gänzlich aus lockerem Sande bestehen, sondern es sind vielmehr felsige Ebenen, auf denen oberflächlich Sandberge aufgeschüttet sind. Von diesem Gesichtspunkte hätten wir nur zwei Wüstenarten: bergige Wüste und ebene Wüste, und die letztere besteht entweder aus nacktem Felsen, oder darauf lagert eine Decke von Sand, von Kies oder von Lehm.

Aber bei der grossen, wenn auch häufig überschätzten Ausdehnung, welche die sandbedeckten Wüsten haben, dürfte es berechtigt erscheinen, die Sandwüsten als einen besonderen Typus auszuscheiden.

Die Embryonalwüsten, wenn ich so sagen darf, sind die Felswüsten, jene gewaltigen Gebirgsländer, die sich von Arabien bis nach dem Atlas finden, und die trotz ihrer bergigen Oberfläche ein Wüstenklima besitzen und demzufolge von den wüstenbildenden Kräften denudiert werden. Es ist begreiflich, dass mit der grösseren Höhe dieser Wüstengebirge ihr Wüstencharakter vermindert wird und dass die Erosion in ihnen im Verein mit chemischer Verwitterung infolge stärkeren Regenfalles bedeutsamer ist, als in ebenen Wüstengebieten, allein was sind 6000 Fuss Erhebung gegenüber dem Wüstenklima, das meilenweit in ihrer Umgebung herrscht und dessen Sandstürme hoch hinauf in die Lüfte zu eilen vermögen?

So sehen wir denn auch, dass die Hochgebirge des Sinai, die Hochebenen der Galâla Wüstengebiete sind, obwohl es dort öfters regnet, ja sogar Schnee fällt.

Was an diesen Felswüsten, sofern sie aus Granitgesteinen bestehen, besonders auffällt, das ist die Seltenheit von Schutthalden Fig. 16. Sie fehlen nicht etwa überall, allein sie gehören zu den Ausnahmen, und während bei uns in Europa ein jedes Gebirge von einem Schuttkegel umgeben ist, der den Fuss des Berges verhüllt und das Steilansteigen der Felsen allmälig vermittelt, so steigen die Granitgebirge der Felswüste meist ohne Schuttkegel unvermittelt aus der Ebene.

Digitized by Google

Wie die Inseln des Meeres steil und unter einem grossen Neigungswinkel sich erheben aus den Fluthen, die allen herabrollenden Schutt

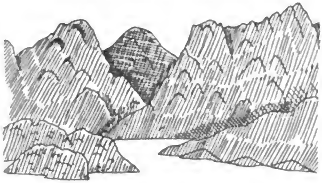


Fig. 16. Granitwände des Uâdi el Uegi in der südlichen Sinaihalbinsel.

entführten, so treten die Wüstenberge kahl und steil aus der Ebene heraus, und wer die Sinaiberge oder gar den 6000 Fuss hohen Djebel Gharib Fig. 17 aus der sandbedeckten Ebene mit dunkelrothen Steilwänden hat heraustreten sehen, der wurde inne, welcher Formunterschied besteht zwischen einem europäischen und einem Wüstengebirge.

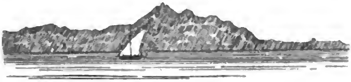


Fig. 17. Djebel Gharib in der arabischen Wüste, von der Sinaihalbinsel gesehen.

Bei Sandsteinbergen ist der Fuss oftmals von Sand verdeckt[1]), während bei Kalk- und Mergelbergen Fig. 18 ungeheure Schuttmassen am Fusse angehäuft sind, die gewöhnlich oberflächlich gebräunt, Übergänge zur Kieswüste bilden. Aber selbst wenn ein Schuttgehänge den Fuss der Berge verdeckt und überkleidet, so erheben sich doch die Berge häufig mit Steilabstürzen daraus, und weit verzweigte Thalsysteme kann man durchwandern, ohne eine Schuttlehne zu finden, welche den Aufstieg auf die Thalwände ermöglichte. Schweinfurth reiste in das Uâdi Rischrasch drei Tage lang hinein, ohne einen Ausweg zu finden.

Schuttkegel, wie sie durch einen Bergsturz oder einen periodisch

1) Vgl. diese Abhandlungen Bd. XIV, Nr. X, p. 50, Fig. 28. Dj. Nakûs.

Digitized by Google

herabstürzenden Wildbach entstehen, sieht man überall in den Wüstengebirgen (s. Fig. 45), aber jene sanft ansteigenden Schutthalden, die

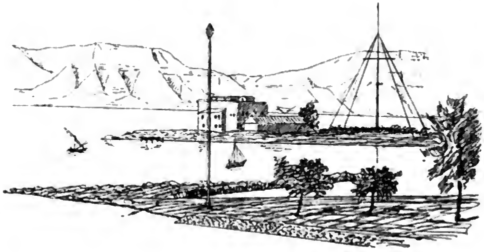


Fig. 18. Ende des Canals bei Sues, mit dem Atakahgebirge.

jede Steilwand in den Alpen umziehen, die vermisst man nicht selten in der Wüste. Ich werde in den beiden folgenden Abschnitten den Charakter der Felswüste näher zu schildern haben.

Die Kieswüste

ist ein Endproduct aller Wüstendenudation. Die steilen Gebirge sind eingeebnet und wo früher ein felsiger Hügel war, da findet sich jetzt eine flache rundliche Erhebung in einem Gebiet, das wesentlich aus Schichtgesteinen bestand; wo einst ein tiefes Thal

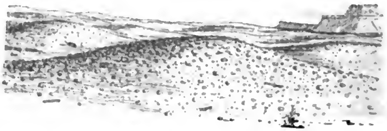


Fig. 19. Kieswüste.

(Uâdi) mit steilen Felsenrändern eine Zone grünenden Schotterlandes umfasst, wo der Gewitterregen gewaltige Wassermengen herabfluthete, da findet sich eine flache Einsenkung, jetzt auch mit Kies bedeckt, und nur spärliche Zwiebelgewächse vermögen zwischen dem kiesigen Boden Spuren der Feuchtigkeit zu sammeln. Braun

Digitized by Google

und schwarz sind alle kieseligen Steine geworden, der Sandwind hat sie abgeschliffen und weithin erglänzen im Sonnenschein die braunen Kiesebenen. Wie mit Speck bestrichen oder wie gefirnisst sehen die Hügel aus. Das ist die Wüste in ihrer »braunen Witwentracht« wie sie am Westrande des Nilthales beginnt und sich von hier viele Tagereisen weit hinein in die libysche Region erstreckt. Das ist die Wüste, die man beim Besuch des grossen versteinerten Waldes vom Djebel Achmar aus weit hinaus verfolgen kann am Nordabfall des Mokkatam. Und zur Kieswüste müssen wir auch die Hamâda rechnen, jene weitausgedehnten Plateaus, die mehr noch als die Dünenregion der Schrecken des Reisenden werden. »Unabsehbar[1]), wie eine Tischplatte dehnt sich die Ebene aus, und Steine, eckige scharfe Steine sind das einzige, was der Blick zu entdecken vermag. Braungefärbte, kantige Steinfragmente, fest gefügt wie ein Mosaik bilden den Boden auf Tagereisen. Wenn auch am fernen Horizont eine Gebirgsstufe mit steilem Abfall erscheint; hat man sie erstiegen, so findet man wieder dasselbe monotone entsetzliche Bild. Erst wenn das steinige Plateau überschritten ist, und die Stufen wieder abwärts führen, dann kann der Reisende hoffen Vegetation und Wasser zu finden.«

»Wir überschritten[2]) den Churmat-el-Tuzizzet und bald zogen wir über eine der schon erwähnten wüsten Ebenen hin, welche jeden Lebens bar, zwar nicht der Vorstellung entsprechen, die man sich noch allzu oft in Europa von der grossen Wüste macht, und die von Sand unzertrennlich ist, aber die Sahara am meisten charakterisieren. In mittlerer Erhebung gelegen, den felsenharten, ausgedörrten Boden dicht bedeckt mit kleinen, vielfach abgeschliffenen Steinen auf einer dünnen Lage dunkelgelblichen Staubes, jeder Vegetation entbehrend, führen sie die Bezeichnung Serîr, welches Wort eine Ebene bedeutet, die sich über ihre Umgebung erhebt. Sie unterscheiden sich von den Hamâden oder wüsten Hochebenen nur durch die höhere Lage der letzteren und die grösseren und unregelmässigeren Steine, mit denen dieselben bedeckt sind. In beiden bilden sich durch Verwitterung flache Erosionsthäler mit

1) G. Rohlfs, Reisen in Marocco p. 93.
2) Nachtigal, Sahara und Sudan I, p. 55.

Digitized by Google

Tafelbergen, deren Höhe dem Niveau des umgebenden Terrains entspricht und ihren ursprünglichen Zusammenhang mit demselben zeigt, und welche deshalb »Zeugen« genannt werden«.

Vielleicht entdeckt der geschulte Blick des Reisenden, dass seine Caravane über ein Pflaster von Versteinerungen reitet, wie ich es am Djebel Béckere östlich von Uâdi el Schêb erlebte, wo ich mehrere Stunden nur über mark- bis thalergrosse Nummuliten ritt, oder wie ROHLFS, ZITTEL und Andere berichten, wenn sie überall nur Austern zu ihren Füssen liegen sahen.

Die Sandwüste

entspricht am meisten jenem Bild, das sich der Laie von einer Wüste macht, und dennoch haben uns erst die Expeditionen der letzten Jahrzehnte belehrt, dass das centrale Sandmeer in der afrikanischen Wüste gar nicht existiert. Die kühnen Reisenden BARTH,

Fig. 20. Dolomitklippe in den Sanddünen bei Toukout, nach Mission de Chadames Fig. XXI, p. 275.

ROHLFS, DUVEYRIER, NACHTIGAL, LENZ u. A. haben die Sahara nach allen Richtungen gekreuzt und haben gezeigt, dass die Sandregion des Igidi ein schmaler gewundener Sandgürtel ist, dass nur westlich von den ägyptischen Oasen sich ein Sandmeer ausdehnt, das nach mehrtägigem Eindringen ZITTEL's sich als unbegrenzt darstellte und dem Vordringen ein Ende machte. Schon die Vertheilung des Sandes in der Sahara lehrt uns also, dass Wüste und Sand nicht nothwendig zusammengehören, dass daher auch alle die Schlüsse über die Entstehung der Wüste hinfälllig werden, die auf der Verbreitung des Sandes fussten, und die in dem Satze gipfeln, dass die Sahara nichts weiter sei, als ein trockengelegter sandiger Meeresboden. Der Sand ist etwas Secundäres in der Wüste und es giebt Wüstengebiete ohne Wüstensand. Der Sand ist ein Product der

Digitized by Google

Wüste. Duveyrier rechnet aus[1]), dass in der algerischen Sahara 45 Millionen Hektar von Sanddünen bedeckt sind, während die Hamâdaplateaus 119 Millionen Hektar einnehmen. »L'observation de la totalité des dunes sahariennes nous les montre suivant une direction générale, du Nord-Est au Sud-Ouest; elle nous les montre sur une ligne plus étroite dans le vaste couloir entre le relief atlantic et le plateau central du Sahara, puis s'élargissant et s'étendant vers le Sud dès que les assises du Ahaggâr s'abaissent.«

Wenn man ähnliche Rechnungen für das ägyptische Wüstengebiet aufstellte, so würde man finden, dass hier der Sand noch geringere Flächen bedeckt im Verhältniss zu der Fels- und Kieswüste.

Die Sandwüste ist ausgezeichnet dadurch, dass ihre ebenen Flächen bedeckt sind mit Dünenketten und Hügeln lockeren Flugsandes, dessen Ursprungsgebiet oft weit entfernt ist von seiner Lagerstätte.

Während die Kieswüste als Sserîr und als Hamâda einen ungemein eintönigen Habitus besitzt, ohne merkliche Bodenerhebungen, ohne Gliederung der landschaftlichen Formen, ist die Sandwüste infolge der leichten Beweglichkeit des sie bedeckenden Sedimentes sehr verschiedenartig gestaltet. Hier finden wir einmal vollkommen ebene sandbedeckte Flächen, die nur von kleinen parallelen Rippelmarken bedeckt sind, an anderen Orten treten isolierte Sandhügel von rundem oder ovalem Umriss auf, und endlich begegnen wir weitausgedehnten Strecken, welche mit hohen Sanddünen bedeckt werden. Diese bis 100 m hohen, oft meilenlangen Sandhügel ziehen parallel nebeneinander hin, oder aber die Sanddünen sind bogenförmig gekrümmt und umschliessen halbkreisförmige Kesselgruben. Der Sand selbst ist von sehr verschiedener Farbe, Korngrösse und Beschaffenheit, meist durch helle reine Farbe ausgezeichnet, und mehr oder minder mit feinem Thonstaub gemengt.

Während Felswüste, Kieswüste und Sandwüste den grösseren Theil der ägyptischen Wüsten bilden, ist der vierte Wüstentypus, die Lehmwüste, relativ seltener, und auf geringere Räume beschränkt.

1) Les Touareg du Nord p. 36.

Digitized by Google

Die Lehmwüste

findet sich überall da, wo durch eine negative Strandverschiebung eines Meeresbeckens früherer Meeresgrund Wüstenland geworden ist. Der dieselbe bildende Meeresschlamm ist getränkt mit Gyps und Salz. Der Gyps krystallisiert zwischen dem Thon aus, das Salz aber infolge seiner Hygroskopicität wird, wenigstens in den tieferen Schichten, nur selten ganz getrocknet. Wenn daher auch die Oberfläche der Lehmwüste mit trockenen zersprungenen Thonschollen bedeckt ist, so befindet sich doch darunter meist ein glitschiger feuchter Thonboden und dieser erschwert das Reisen über eine Lehmwüste ungemein. Lehmwüsten finden sich vielfach in den Küstenebenen der südlichen Sinaihalbinsel und längs des Küstensaums des Mittelmeers, besonders im Gebiet der sogenannten Schotts südlich von Tunis [1]. Aber auch fern vom Meere finden sich ähnliche Bildungen. »In vielen Depressionen der Sahara finden sich Seen, welche durch Verdunstung zur »Sebcha« werden, d. h. es bildet sich eine harte Oberfläche mit schlammiger, sumpfiger Unterlage. Es giebt Seen, die so salzhaltig sind, wie z. B. der von Bilma, dass statt einer salzerdigen Kruste sich eine reine Salzkruste bildet. Es ist eigenthümlich, dass nach der Verdunstung des Wassers die Sebchaoberfläche immer in sehr regelmässige, meist sechseckige Polygone zerklüftet. Die Sebcha von Tamentil machte auf mich den Eindruck eines plötzlich erstarrten Meeres, dessen Oberfläche gekräuselt gewesen ist. Die Schollen befinden sich oft in senkrecht aufgerichteter Stellung, ähnlich einer Stromeisdecke bei Eisgang. Im Gebiet des Atlas nennt man Sebcha: Schott [2].«

»Le [3]) sol de la sebkha de Mazazem, profondément et irrégulièrement défoncé, est formé d'un mélange de terre ou de grès décomposé et de sel marin; à l'extrémité de la sebkha, le sol se relève assez rapidement.«

Alle Oasen der nordafrikanischen Wüsten sind nach G. Rohlfs durch Sebchabildungen ausgezeichnet.

---

1) Vgl. Capt. Roudaire, La Mission des Chotts. Paris 1877.

2) G. Rohlfs, Die Sahara oder die grosse Wüste. Ausland 1872, p. 1088.

3) Mission de Rhadames p. 257.

Digitized by Google

Oft ist es schwer, die Grenze zwischen diesen verschiedenen Wüstentypen festzustellen, oft aber sind die Grenzen scharf und bestimmt. So lesen wir bei Lady Blunt [1]): »Wie die centralarabische Sandwüste (Nefud) ohne jeglichen Übergang in der Hamada beginnt, so erreicht sie, ungefähr 5 Meilen von Dj. Aja entfernt, ebenso plötzlich ihr Ende, um wieder der Hamada Platz zu machen. Aus ihrer Sandsteinfläche erhebt sich dann 1500′ hoch in wilden phantastischen Formen der Dj. Aja, er macht den Eindruck, als ob ein Granitkoloss auf den anderen aufgethürmt worden sei.«

Die hier angegebene Eintheilung der Wüsten enspricht auch ziemlich genau den Typen, welche die Beduinen unterscheiden, wie ich sie nach Duveyrier, Euting, Nachtigal, Schweinfurth und mündlichen Mittheilungen des Herrn G. Rohlfs hier zusammenstelle:

1) Felswüste:	Djebel Tasili Plateau Westsahara Rodm Innerarabien Charaschaf für zerrissene Felsen in der libischen Wüste.
2) Kieswüste:	a) Sserîr runde Kiesel, flachgewellte Flächen. b) Hamâda scharfkantige Steine, gewöhnlich in röthlichem Lehm eingebettet, und Hochebenen bedeckend.
3) Sandwüste:	Erg westliche Sahara Igidi desgl. Areg östliche Sahara Nefûd Innerarabien Ramle Sandebene.
4) Lehmwüste:	Sebcha westliche Sahara Schott Tunesien Djefdjef in der Oase Sokna für polygonal zersprungene Lehmflächen gebraucht.

1) Petermanns, Mitth. 27, p. 217.

Digitized by Google

III. Die Felswüste.

1. Dislocationen in Ägypten.

Wer die geologischen Arbeiten der Gegenwart mit denen vergleicht, die vor wenig Jahrzehnten aufgenommen wurden, dem muss es auffallen, welche Fortschritte auf dem Gebiet der Tektonik gemacht worden sind. Während man sich früher damit begnügte, zu sagen, »die Schichten eines Profiles sind nicht horizontal und fallen unter einem bestimmten Winkel ein«, werden jetzt die tektonischen Verhältnisse eines Gebietes häufig zum ausschliesslichen Forschungsobject erwählt, und wo man früher kaum eine schwache Neigung der Schichten erblickte, da findet man heute ein ausgedehntes System von tektonischen Leitlinien und Sprungnetzen. Immer mehr bricht sich die Überzeugung Bahn, dass die massgebenden topo-

Fig. 21. Gefaltete Kreidekalke bei Abu Roasch.

graphischen Charaktere einer Landschaft durch tektonische Störungen bestimmt werden, und dass speciell die hydrographischen Grundzüge einer Gegend auf solchen beruhen. Bei genauerem Studium findet man selbst in dem Flussnetz des mittleren Saalthales[1]), das früher als reine Erosionswirkung betrachtet werden durfte, vielfache Brüche und Dislocationen und vermag einen ursächlichen Zusammenhang beider Erscheinungen nachzuweisen. Alles das aber ist eine Errungenschaft der neueren Zeit und so darf es uns nicht Wunder

1) R. Wagner, Die Formationen des Buntsandsteines und des Muschelkalkes bei Jena. Jahresber. der Ackerbauschule, Zwätzen 1887.

Digitized by Google

nehmen, wenn wir in vielen geologischen Abhandlungen über die Wüste betont finden: »die Schichten liegen vollkommen horizontal«, oder »von tektonischen Störungen ist keine Andeutung vorhanden«. Ich will demgegenüber gleich hier vorausschicken, dass ich auf meiner Wüstenreise wenige Profile gesehen habe, die nicht in Zusammenhang gestanden hätten mit Dislocationen, und in vielen Fällen sind die Dislocationen so bedeutende, dass bei der Gliederung der in Ägypten auftretenden Schichtensysteme tektonische Störungen leicht zu Irrthümern Anlass geben können.

Meine Reise war viel zu ausgedehnt, als dass es mir möglich gewesen wäre, genaue tektonische Aufnahmen zu machen; das einzige Gebiet, das ich etwas im Einzelnen tektonisch untersucht habe, ist die Kreideregion westlich von Giseh[1]) und hier fand ich auf dem engsten Raum eine solche Complication der tektonischen Verhältnisse, dass ich weit entfernt bin zu glauben, durch meine 7tägigen Untersuchungen die Tektonik des Gebietes definitiv aufgeklärt zu haben.

Wer die Wüste nicht kennt, der kann sich keine Vorstellung davon machen, wie offen tektonische Störungen dort zu Tage liegen und wie leicht sie constatirt werden können. Eine der Hauptursachen ist die, dass die Wüstenluft meist von einer Durchsichtigkeit und Klarheit ist, welche wir in Europa nur überaus selten beobachten. Auf 40 km kann man mit der grössten Deutlichkeit sehen und dadurch ist man im Stande, auf eine gewisse Entfernung hin geologische Verhältnisse mit einiger Sicherheit zu beurtheilen. Duveyrier[2]) schreibt, dass er von Timozzoudjên bis Tasîli, auf eine Entfernung von 80 Kilometer, hat sehen können, und dass er oft 30—60 Kilometer weit mit dem Compas visiert habe. Der Mangel von Schutt und von Vegetation bewirkt

Fig. 22. Verwerfungen im Uâdi Ashar (südl. Galâla).

1) J. Walther, Sur l'apparition de la craie aux environs des Pyramides, Bull. de l'Inst. Egypt. 1887 und G. Schweinfurth, Petermann's Mitth. 1889.

2) Les Touareg du Nord, p. 130.

Digitized by Google

es, dass jede Felswand, jedes Berggehänge ein grosser Aufschluss ist, und wenn wir in Europa oft stundenweit nach einem Steinbruch oder einem Strasseneinschnitt suchen müssen, so liegt in der Wüste Alles so offen zu Tage, dass jede, selbst die kleinste Verwerfung überall deutlich sichtbar ist. Verwerfungen brauchen in der Wüste nie aus dem unregelmässigen Schichtenverband erschlossen zu werden, sondern man kann sie leibhaftig sehen, und oft genug sogar die Bruchspalte als offene Kluft beobachten.

Ich musste diese Bemerkungen vorausschicken, weil es sonst jeden Geologen mit Recht wundern müsste, dass ich versuche über die Tektonik eines nur durchquerten Gebietes zu sprechen.

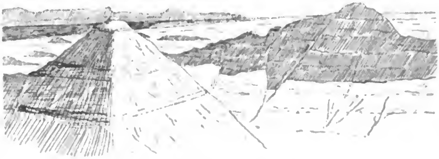


Fig. 23. Verwerfungen in der südl. Galâla an deren Absturz gegen das Rothe Meer (links im Hintergrund die südliche Sinaihalbinsel).

Alle Dislocationen in Ägypten sind nacheocän. Nur auf der Sinaihalbinsel habe ich beobachten können, dass schon vor dem Carbon eine Dislocationsperiode vorausging; denn die unzähligen Porphyrgänge, welche mit NO-SW-Streichen und 80° SO-Fallen den centralen Granit des Sinai durchsetzen und doch jedenfalls einer dislocirenden Bewegung ihren Ursprung verdanken, werden discordant überlagert von dem carbonischen Sandstein des Uâdi Nasb, den ich mit carbonischen Fossilien im Uâdi Schellâl antraf [1]).

Die grössten Bruchlinien im Bereich der Sinaihalbinsel verlaufen SO-NW und entsprechen den Ufern des Meerbusen von Sues. Wie schon Russegger, dann Fraas und Suess ausgesprochen haben, ist dieser Busen ein versenkter Graben, der begrenzt wird von den beiderseitigen Küstengebirgen. In meiner oben citirten Abhandlung

1) Die Korallenriffe der Sinaihalbinsel. Diese Abhandl. Bd. XIV, Nr. X, p. 446.

Digitized by Google

habe ich die tektonischen Verhältnisse der Sinaihalbinsel durch eine Karte und viele Profile erläutert.

Auf der Westküste des Meerbusens von Sues, im Gebiet des Uâdi Arabâh und des Galâla-Plateaus, konnte ich jene Bruchrichtung nicht wiederfinden, denn der Abfall der beiden Galâla's gegen die Arabâhebene, je einem oder mehreren grossen Brüchen entsprechend, verläuft SW-NO und alle die kleinen Brüche im Gebiet des Kohlenkalkes im Nubischen Sandstein[1]) halten dieselbe Richtung ein. Im südlichen Uâdi Askar s. Fig. 22 sah ich viele kleine und grössere Verwerfungen, welche wieder SO-NW liefen, während die staffelartigen Brüche, die im Relief des Galâlaplateaus deutlich hervortreten, N-S verliefen. Wie beistehende Fig. 24 erkennen lässt, sind in den Steilabsturz der südlichen Galâla Brüche von bedeutender Sprunghöhe zu erkennen, welche ungefähr N-S verlaufen dürften.

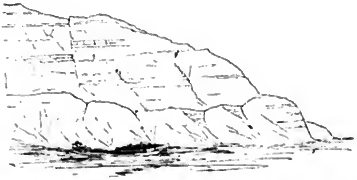


Fig. 24. Verwerfung im Steilabsturz der südl. Galâla hinter dem Kloster St. Antonius.

So sehen wir schon in einem so engen Gebiet eine grosse Mannigfaltigkeit der Bruchrichtungen und ganz ähnlich sieht es beiderseits des Nilthales in der Nähe von Cairo aus. Die Schichten des Mokkatam fallen etwa 5° nach N. Das Uâdi Dugla entspricht einer fast O-W verlaufenden Bruchlinie, und die südlich davon ziehenden Thäler Uâdi Hoff und Uâdi Guerraûi zeigen in ihrem Verlauf ganz bedeutende, ebenfalls W-O streichende Bruchlinien.

Begeben wir uns auf die gegenüberliegende libysche Seite, so finden wir schon geneigte Nummulitenkalke als Basis der Pyramiden von Giseh s. Fig. 25, und wenn wir von hier in nordwestlicher

1) Über eine Kohlenkalkfauna aus der arab.-äg. Wüste, Zeitschr. d. deutsch. geol. Ges. 1890.

Richtung vorschreiten, kommen wir in das schon erwähnte Kreidegebiet von Abû Roâsch mit seinen fabelhaften Dislocationen. Alle die, sehr versteinerungsreichen Schichten der Kreide sind als mantelförmige s. Fig. 24 Schalen umeinander gelegt, viele Bänke ragen als 50 m hohe, 70° geneigte Riffe aus dem Boden und bilden aufgebrochene Gewölbe von gewaltigen Dimensionen. Es ist ganz ausgeschlossen, dass diese Lagerungserscheinungen eine Folge von Unterwaschungen und Abrutschungen seien[1]).

Was aber diesen Aufbrüchen noch einen höheren Werth verleiht, ist, dass sie keineswegs auf Abû Roâsch beschränkt sind, sondern ganz ebenso im Gebiet des Kohlenkalkes vom Uâdi Arabâh (s. meine oben citirte Arbeit) und in der Sinaiwüste am G. Marchâ und G. Súffr wieder auftreten (s. Korallenriffe, Fig. 1 und Fig. 11 und Taf. VII Fig. 3).

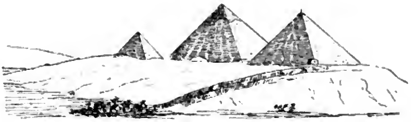


Fig. 25. Dislocierte Kalkbänke am Fusse der Pyramiden von Giseh.

Aus allem dem geht hervor, dass im Gebiet der ägyptischen Wüsten tektonische Störungen keineswegs fehlen, dass sie vielmehr eine wichtige Rolle in der Configuration des Wüstenlandes spielen, und daher auch bei der genetischen Beurtheilung der Oberflächenformen berücksichtigt werden müssen. Mag es auch vorläufig nicht im Einzelnen zu belegen sein, so glaube ich doch meiner Ueberzeugung dahin Ausdruck geben zu sollen, dass ich ausspreche: In den ägyptischen Wüsten kommen Dislocationen vor; sie bedingen häufig den Verlauf der Thäler und die Conturen der Bergländer und geben den ersten Anlass zu

1) Ich bin fest überzeugt, dass ein genaues Studium dieses Gebietes für die Tektonik überaus werthvolle Resultate ergeben müsste, denn einerseits ist es schwierig, diese aufgebrochenen Gewölle als durch Seitenschub entstandene Falten aufzufassen, andererseits stösst die Erklärung, welche nur Versenkung und stehenbleibende Horste annimmt, wegen der geringen Dimensionen dieser Aufbrüche auf Schwierigkeiten.

jener Mannigfaltigkeit von Niveauveränderungen, welche die wüstenbildenden Kräfte weiter ausarbeiten.

2. Die Formen der Felswüste.

Die Mehrzahl der Gesteine in Ägypten sind sedimentären Ursprungs und deshalb in horizontale Bänke gegliedert, welche wie die Blätter eines Buches übereinander liegen. Dadurch wird der Einwirkung der wüstenbildenden Kräfte eine bestimmte Richtung gegeben und werden Wirkungen erzielt, die zum Theil von der gebankten Structur der Felsen und nur zum andern Theil von dem Charakter jener Kräfte abhängig sind. Wollen wir daher die Wirkungsweise der meteorologischen Kräfte in der Wüste rein, isoliert, und unbeeinflusst von Nebenursachen beobachten, so müssen wir als Untersuchungsobject ein Gestein wählen, das von Natur homogen gebildet und durch keinerlei besondere Absonderungsformen verändert ist. Ein solches Gestein ist der Stockgranit, welcher in der arabischen Wüste am G. Gharib, und in viel grösserer Ausdehnung auf der Sinaihalbinsel zu Tage tritt. »In der Starrheit, mit der die krystallinischen Gebirge des G. Gharib sich vor dem Reisenden erheben, liegt etwas Abstossendes, fast Unheimliches; die intensiv rothen und schwarzen Färbungen, die schuttlose Nacktheit der Hänge, ihr unvermitteltes Aufsteigen aus einer glatten, fein kiesigen Unterlage erhöht diese Wirkung.«[1])

»Die Wüstennatur ist wenig erfinderisch, was uns einmal begegnet ist, das treffen wir zwanzigmal wieder. Wie die Stufen einer Treppe, reihen sich im Uâdi Budrah ein umschlossenes Hochthal an das andere. Jeder neue Kessel steht auf höherer Basis, als der den wir verlassen. Wenn wir ihn betreten, so glauben wir, seine Randberge müssten sehr hoch sein, sobald wir aber die letzteren ganz überblicken, so findet sich, dass ihre Unterlagen so flach und niedrig erscheinen, als ihre Gipfel hoch sind.«[2]) Auf dem Weg vom Uâdi Haschêb (am Râs Muhámmed) nördlich nach dem Uâdi Sáchara beobachtete ich ganz dieselben Verhältnisse wie ich sie im Uâdi Budrah gesehen und wie sie Ebers von dort mit so treffenden Worten schildert. Die Thäler im Granitgebiet des Sinai sind nicht langgestreckte Rinnen

1) P. Güssfeld, Petermanns Mitth., Bd. 23, p. 256.

2) G. Ebers, Durch Gosen zum Sinai. 1872, p. 131.

Digitized by Google

mit sich verästelnden Zweigen, sondern es sind ursprünglich isolierte circusartige Mulden, von einem Kranz steiler Wände eingerahmt, welche erst secundär durch Wassergüsse zu einem einzigen Thalsystem vereinigt wurden, und an dem gewundenen Längsfaden sich wie Kugeln eines Rosenkranzes anreihen (wie Ebers s. u. diese Erscheinung ungemein bezeichnend wiedergiebt).

L. Rütimeyer[1]) beschreibt in ganz ähnlicher Weise vom Sinai: »Immer grossartiger wurde beim Weiterwandern die Thalbildung, die besonders im Uâdi Sidr ihren Höhepunkt erreichte, wo gewaltige Felskessel mit violett-röthlichem Abendduft erfüllt, umgeben von himmelhohen Steilwänden aus rothem Granit, durchzogen mit breiten grünen Dioritgängen und gekrönt von Nubischem Sandstein, der in der Abendsonne wie glühendes Kupfer leuchtete, ein Bild von hinreissender Farbenpracht darboten.«

Diese Erscheinung welche jedem Reisenden im Sinaigranitgebirge auffallen muss, entfernt sich weit von den Thalformen, welche wir in unseren europäischen Gebirgen zu sehen gewohnt sind. Nur wenn wir uns in die höheren Alpen begeben, da finden wir ähnliche runde Thalgebilde. Die Möglichkeit einer Eiswirkung kann ich für die betreffenden Thäler nicht zugeben. Die von O. Fraas als Moränen beschriebenen Schottermassen am Sinai haben mit Eistransport nicht das geringste zu thun (s. unten Fig. 51), von Gletscherwirkung ist nirgends eine Spur zu entdecken. Ausserdem sehen diese Thalkessel keineswegs wie die Reste und Spuren eines früher vollkommen anderen Klimas aus, sondern sie harmonieren so sehr mit allen Eigenthümlichkeiten der Wüste, scheinen so frisch und recent gebildet, dass wir uns die naheliegende Frage vorlegen müssen, ob nicht die gegenwärtig dort wirksamen geologischen Kräfte imstande seien und gewesen sind, diese sonderbaren Circusthäler zu bilden.

Das Auffallende an den Circusthälern des Sinai ist die Thatsache, dass man ein tiefes Loch im Gebirge beobachtet und doch nicht den Weg sieht, auf dem das fehlende Gesteinsmaterial heraustransportiert worden ist und so tritt an uns die Aufgabe zu zeigen, wie diese Erscheinung als ein specifisches Wüstenphänomen zu erklären ist.

1) Globus, Bd. 57, No. 11, Sep. p. 6.

Digitized by Google

Wasser und Eis sind als geologische Transportmittel an die Schwerkraft gebunden und sind nicht im Stande, aus einem rings geschlossenen Thal Gesteinsschutt zu entfernen. Anders der Wind. Er kann überall hingelangen, kann überall seine Kraft entfalten, er überwindet die Schwerkraft und hebt das abbröckelnde Steinchen hoch empor, um es wirbelnd davon zu tragen. Wasser und Eis können allerdings selbst Gesteine zerstören und zerkleinern, diese Kraft besitzt der Wind nicht, aber dafür hat er in der Wüste kräftige Helfer. Die Insolation, die chemische Verwitterung, das Sandgebläse, sie alle zerkleinern das feste Granitgestein und der Wind braucht das so gelockerte und zerkleinerte Material nur aufzuheben und zu transportieren. Man muss es selbst beobachtet haben, mit welcher Kraft in diesen kahlen Granitfelsen der Sturm dahinbraust, um zu verstehen, dass er im Laufe der Jahrtausende eine Kraftleistung vollziehen kann, welche an Wirkung der Thätigkeit des fliessenden Wassers vollkommen gleichkommt und nur in der Art und Weise der Wirkung sich anders gestaltet.

Der Wind ist es, welcher in der Wüste solche Riesengruben ausgräbt, der Wind, der an keine Schwerkraft gebunden ist, der das verwitterte Material da herausholt, wo er es findet und der es dahin trägt, wo seine Kraft erlahmt. Insolation, Verwitterung, Erosion vertiefen eine flache Mulde im Granitgebiet; je tiefer sich diese Kräfte in die Felsen eingraben, desto mehr wird ihre Thätigkeit gesteigert, und wo bei uns der so gebildete Schutt liegen bleiben und dadurch weitere Schuttbildung verhindern würde, weil kein erodierendes Wasser ihn herauszutragen vermag, da stellt sich in der Wüste der Wind ein, wirbelt lustig in den Kessel hinein und hebt Alles hoch in die Luft, was er gelockert findet, um es mit sich fort zu tragen.

Dass secundär diese windgegrabenen Kessel durch erodierendes Wasser angeschnitten und mit einander zu einem hydrographischen System verbunden werden können, ist leicht verständlich und manch' interessantes Beispiel solcher Art habe ich im Granitgebiet der südlichen Sinaihalbinsel beobachtet.

Beistehend gebe ich eine topographische Skizze s. Fig. 26 des Uâdi Muchefred, eines rundlichen Kessels, in den von mehreren Seiten Thalsysteme münden und der von dem Uâdiarm gleichen Namens nach Süden entwässert wird.

Digitized by Google

Dieses Uâdi war etwa 6 m tief mit Geröllen und Schutt angefüllt worden, und bildete den einzigen Abzugskanal für das umliegende Thalsystem, bis ein etwa 1 m breiter Porphyrgang, der die Granitwand westlich vom Ausgang des Uâdi durchsetzte, zerstört wurde und durch seinen Zerfall einer schmalen Thalspalte den Ursprung gab. Diese Spalte ist so eng, dass ein beladenes Kamel sie nicht passieren kann, während sie von den Beduinen gelegentlich als Pass benutzt wird. Durch die Bildung dieser Spalte wurde das ganze Uâdisystem verändert. Die Wassermassen, die vorher nach S. im Uâdi Mucheîred geflossen waren, nahmen ihren Abfluss durch diese enge Spalte nach W. Sechs Meter tief hatte sich schon das neue Abflussthal in die alten Uâdischotter eingegraben, und das gesammte hydrographische System der Umgegend war gründlich verändert durch die Öffnung einer schmalen Gangspalte im Granit.

Fig. 26. Uâdi Mucheired in der südl. Sinaiwüste.
1. Granitgebirge.
2. Mit Schotter erfüllte Thalsohle.
3. Abflussrinne des Thales.

Es wäre leicht, noch viele ähnliche Beispiele zu bringen, welche lehren, wie das Uâdisystem einer Wüstenregion sich gelegentlich verlegen kann und wie die Circusthäler im Granitgebiet secundär durch Erosion zu Thalsystemen vereinigt werden.

Betrachten wir jetzt die positiven Reliefformen in der Granitwüste, so tritt uns, abgesehen von Einzelheiten, die schuttlose Steilheit und Zerrissenheit der Bergspitzen auffallend entgegen. In Europa bildet der Granit weite sanft gerundete Kuppen, in der Wüste wetteifert er an Zerrissenheit und Spitzengliederung mit den Dolomitzacken von Südtirol. Das Profil des Serbal, des Umm Schomer, des Gharib lässt sich nur mit dem Langkofel, dem Rosengarten und den drei Zinnen am Misurinasee vergleichen. Obenstehende Fig. 17, beistehende Fig. 27 und Fig. 28 oder die Zeichnungen Fig. 12, 14, 33 in meinen »Korallenriffen der Sinaihalbinsel«, werden diese Worte illustrieren. Und das es in der ganzen Wüste bis zum Atlas so ist, das lehren die Berichte und Skizzen aller Wüstenreisenden. Granit-

Digitized by Google

nadeln und phantastische Zacken begegnen dem Auge überall: »Etwa in der Mitte des Uâdi el Schêchs bildet der bröckelige weiche Granit auf mehr als eine Stunde Wegs phantastische Formen, nicht bloss Säcke, Vollkugeln und Hohlkugeln, Brillen u. s. w., sondern wirklich

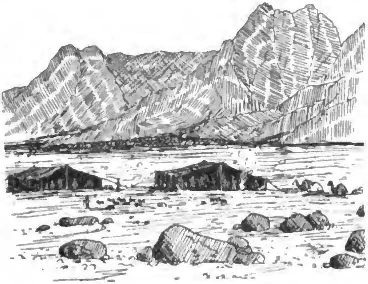


Fig. 27. Beduinenlager im Uâdi Timan.

überraschende Thiergestalten und Physiognomien. Man braucht seine Phantasie gar nicht anzustrengen, so sieht man einen Elephantenkopf, Affen, Panther, Kameele und dergleichen, Formen, die offenbar seit Jahrhunderten die Aufmerksamkeit aller Vorüberziehenden auf

Fig. 28. Uâdi Rischē in der südl. Sinaiwüste.

sich gezogen haben.«[1]) Man vergleiche mit dieser Schilderung die Zeichnungen, welche Duveyrier[2]) vom G. Idinên giebt; oder Doughty's

1) O. Fraas, Aus dem Orient, p. 20.
2) Les Touareg du Nord. Pl. II, Fig. 2.

Digitized by Google

Zeichnungen aus Arabien[1]), überall treten uns Felsformen entgegen, die nicht häufig in Europa im Granitgebiet beobachtet werden, die aber in der Wüste die Regel bilden und durch ihre Form und ihre Vertheilung beweisen, dass es äolische Kräfte sind, welche sie erzeugt haben, dass sie Deflationserscheinungen sind.

Ich habe keine der grösseren Oasen gesehen und kann daher meine Vermuthungen über die Bildung jener sonderbaren Depressionen weder mit Beobachtungen belegen, noch an dieser Stelle auseinandersetzen.

Bleiben wir auf dem Boden der Thatsachen und wenden wir uns jenen Oberflächenformen zu, welche die geschichteten Wüstengebirge zeigen. Wir werden ganz ähnliche Erscheinungen wie im Granitgebiet finden, nur mit dem Unterschied, dass die Bankung des Gesteins hier einen massgebenden Einfluss gewinnt.

Wir beginnen mit solchen Gebieten, in denen Verwerfungen und andere Dislocationen nicht betheiligt sind, und lesen in den Berichten der Reisenden von unermesslich grossen horizontalen Tafelgebirgen, welche überall in der Sahara auftreten.

»Mit dem Ikóhauen-Gebirge beginnt ein ausgedehntes Tafelland, das überall denselben Charakter trägt. Jener Sandstein, der den Reisenden vom Südrande der Hamáda el homra an ununterbrochen begleitet hat, bildet hier ausschliesslich die Masse des ganzen Gebirges. Nirgends ist die horizontale Lagerung seiner Schichten gestört, alle Gipfel und Kämme liegen im gleichen Niveau, alle Profile zeigen dieselben staffelartigen Absätze der einzelnen Schichten, und alle Thäler haben denselben Verlauf, eingesenkt in den groben Schotter, der sich auf beiden Seiten in langen Terrassen ausdehnt und gleichsam die unterste Stufe des Gebirges bildet. Ohne jeden Pflanzenwuchs und mit schwarzen Steinen übersäet, tragen diese Flächen ganz den Charakter der Hamáda und bilden eine schroffe Grenze für die Vegetation der tiefer liegenden sandigen Uâdi.«[2]) Man könnte den Charakter dieser Tafellandschaft nicht besser zusammenfassen, als es hier von dem leider so früh verstorbenen v. BARY geschehen ist. »Das Tümmogebirge im Südfesan erscheint in der Form eines

1) Arabia Deserta. Vol. I, p. 243.

2) Zeitschrift des Vereins für Erdkunde zu Berlin 1876, p. 184.

Digitized by Google

Quadrates wie ein ungeheuerer, vom Regen oder Wind ausgefurchter »Zeuge«. Der Gipfel jedes Berges oder Bergzuges ist glatt und alle sind fast von gleicher Höhe, woraus man schliessen kann, dass sie früher ein Ganzes bildeten. Es ist dies überhaupt durchgängig die Natur der Wüstenberge und Wüstengebirge; fast alle haben gleiche Höhe und überragen selten die Hamada. Man kann mit Recht sagen, dass alle Berge und Gebirge in der Wüste »Zeugen« im Grossen, oder grosse Tafelberge sind.«[1])

»Der nördliche Rand der algerischen Sahara wird von einer Menge isoliert aus der Erde aufsteigender Berge bedeckt, welche man wegen ihrer eigenthümlichen Form Tafelberge nennt, während sie der Araber als el meida (Tisch) bezeichnet. Solche 200—300 Fuss hohe Tafelberge schliessen in grosser Anzahl das flache Land von Biskra ein.«[2])

»Le chemin au grand Sinaoun est tracé sur un plateau qui provient d'une manière certaine de la démolition et de l'enlèvement d'un plateau supérieur dont il reste un nombre considérable de témoins. Ces témoins sont des montagnes souvent complètement isolées les unes des autres et réparties sans ordre sur le plateau inférieur; elles ont généralement la forme de troncs de pyramides quadrangulaires dont le sommet est occupé par la couche de grès à inoceramus; il ne reste parfois de cette couche que de quelques blocs offrant l'aspect de ruines de châteaux-forts du moyen-âge, ou qu'un seul bloc de un à deux mètres cubes, et parfois aussi la couche a complètement disparu, ainsi qu'une partie des couches inférieures.«[3])

»Im Uâdi Ralle (Tripolis) sieht man im Osten eine Reihe von flachen Hügeln, deren Oberfläche im gleichen Niveau liegt. Es sind dies offenbar die Reste einer früheren Hamada, die durch fortwährende Erosion (?) in viele kleine Tafelberge zertheilt ist,« und »Vom Südrande der grossen Hamada bis zum Tafelamingebirge findet sich immer rothbrauner Sandstein in Tafelgebirgen. Die Formen, in denen er auftritt, sind entweder Tafelberge von langgestreckter Gestalt, oder

---

1) G. Rohlfs, Die Wüste zwischen Fesan und Kauar. Petermanns Erg.-Hefte, Bd. 25, p. 18.

2) Buvry, Zeitschr. f. Allgem. Erdkunde. Berlin 1858, p. 194.

3) Mission de Ghadames, p. 245.

Digitized by Google

wenn die Zerklüftung der obersten Schichten aufs Äusserste vorgeschritten ist, kommt eine gezackte Kammlinie zustande. Einzelne isolierte Massen sind oft auch in Kegelform anzutreffen, indem oben von der obersten Lage nur noch der jetzige Gipfelpunkt übrig geblieben ist, z. B. Nesaret, Erruin u. s. w.«[1])

Fig. 29. Der Zeuge Omm-el-Renneiem in der Oase Chargeh nach Schweinfurth in Petermanns Mitth. 1887, 19.

So sehen wir also in allen Theilen der Wüste, die von Dislocationen verschont sind, ausgedehnte Tafelgebirge mit steilen Rändern, die sich häufig auch ihrerseits aus tafelförmigen Stufen aufbauen, und ihnen vorgelagert kleinere Tafelberge, die einst im Zusammenhang mit jenen, jetzt von ihnen abgerissen und durch Einschnitte getrennt sind, deren Sohle der umgebenden Tiefebene gleich

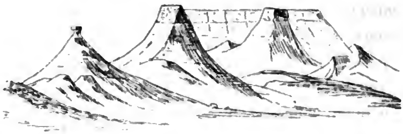


Fig. 30. Zeugengruppe Bir Terfaya nach Bernard, Quatre mois dans le Sahara S. 16.

ist. Diese Vorberge nennt man Zeugen (témoins), da sie die Marksteine für die frühere Ausdehnung des Tafelgebirges darstellen. Das Profil dieser Zeugen und Tafelberge ist allen Wüstenreisenden wohl bekannt, und wird durch beistehende Zeichnungen, Fig. 29 nach Schweinfurth[2]) aus der Oase Chargeh, Fig. 30 nach Bernard[3]) und

1) von Bary, Zeitschr. der Gesellschaft für Erdkunde zu Berlin 1876, p. 175 u. 196.

2) (Omm el Renneiem). Schweinfurth, Petermanns Mitth. Bd. 21, Taf. 19.

3) (Bir Terfaya). Bernard, Quatre mois dans le Sahara. Paris 1881, p. 16.

Digitized by Google

Fig. 31[1]) erläutert. Die Bildung dieser Zeugen findet aber nicht allein im Grossen statt, sondern bis ins Kleinste ist eine geschichtete Felsmasse in der Wüste häufig nach dem »Zeugentypus« gegliedert.

Die Bildung der Zeugen ist in erster Linie dadurch bedingt, dass härtere Felsbänke mit weichen Schichten wechsellagern. Sind nur wenig härtere Bänke im Verbande der weicheren Schichten, dann sind die Zeugen hoch, sind sie häufig, so sind die Zeugen niedrig. Die Höhe der Zeugen entspricht der Mächtigkeit der weicheren Gesteinsschichten zwischen zwei härteren Bänken. Wo das Gestein keine solchen Härteunterschiede erkennen lässt, da fehlen auch die Zeugen, und statt dessen findet sich eine blose treppenartige Stufenlandschaft.

Zweitens werden die Zeugen seltener, je wasserreicher das Gebiet der Wüste ist. Während echte Zeugen in der Galâla nur

Fig. 31. Zeugenlandschaft bei Guelb-el-Zerzour nach Mission de Chadamès Fig. X, p. 245.

selten zu sehen sind, nehmen sie an Zahl zu, wenn man gegen Westen wandert, und ihre Hauptverbreitung treffen wir in den Gebieten, die am wasserärmsten sind und am typischsten die klimatischen Charaktere der Wüste zeigen.

Besonders wichtig aber ist die oben erwähnte Thatsache, dass es Zeugen von allen Dimensionen giebt. Man findet sie von 50 m Höhe bis zu 0,20 m Höhe; ganze Felsgehänge setzen sich aus kleinen und grossen Zeugen zusammen, ganze Flächen sind mit Miniaturzeugen bedeckt. Endlich finden wir sie in allen Entwicklungsstadien; solche die noch durch eine Brücke mit einer breiteren Terrassenstufe zusammenhängen, leiten hinüber zu den isolierten Sockeln. Nun ist die Ansicht mehrfach ausgesprochen worden, dass jene grossen auffälligen Zeugenberge in einem früheren wasserreichen Klima entstanden seien. Nehmen wir das an, so müssen alle jene Miniaturzeugen dasselbe Alter besitzen und da wir nachweisen können,

1) Mission de Chadamès X, p. 245.

dass seit der Pharaonenzeit keine tiefgreifenden klimatischen Veränderungen in Ägypten stattgefunden haben, so müssen die kleinen 20 cm hohen Zeugen mindestens 4000 Jahre alt sein und dürften seit jener Zeit ihre Form absolut nicht geändert haben. Im Gegensatz hierzu sehen wir fast vor unseren Augen in der Wüste ungemein intensive Denudationsprozesse sich vollziehen, welchen unmöglich ein 20 cm hoher Miniaturzeuge 4000 Jahre lang widerstehen kann. — Das beweist uns, dass die Zeugenbildung ein Vorgang ist, der sich in der Gegenwart noch vollzieht und der als eine specifische Wüstenerscheinung betrachtet werden muss.

Wenn, wie es von vielen Reisenden geschehen ist, die Zeugen als Erosionserscheinungen aufgefasst werden dürften, wenn gewaltige Wasserfluthen sie gebildet hätten, dann müssten wir sie innerhalb der Wüste an den Stellen finden, wo die erodierende Thätigkeit des Wassers sich nachweisen lässt, am Rande der Uâdi, und besonders in den wasserreichen Gebieten der arabischen Wüste. Ja noch mehr: Wenn die Zeugen eine Wirkung fliessenden Wassers wären, so müssten wir sie auf dem ganzen Erdenrunde finden, nur n i c h t i n d e r W ü s t e, wo es so wenig Wasser giebt. Ich halte es für vollkommen undenkbar, folgende Thatsachen:

1) die Häufigkeit der Zeugen in den wasserärmsten Gebieten der Wüste,
2) ihre Seltenheit in den wasserreicheren Gebieten der arabischen Wüste,
3) ihr absolutes Fehlen auf der ganzen Erde mit Ausnahme der Wüsten,

mit der Hypothese in Einklang zu bringen, dass die Zeugen eine Wirkung gewaltiger Wasserfluthen seien.

Ich halte vielmehr die Bildung der Zeugen für eine Erscheinung, welche an das Wüstenklima gebunden ist, und will es versuchen, ihre Entstehung zu erklären. Vorher aber muss ich noch einer Erscheinung gedenken, welche das Spiegelbild der Zeugenform ist und die gleiche Entstehungsweise hat.

»Die Wadis der Hochebene von Hadhramaut stellen sich alle, wenige Ausnahmen abgerechnet, als tief eingeschnittene, von steilen Felswänden begrenzte, mehr oder minder breite Schluchten dar, deren Boden meistentheils mit einer üppigen Vegetation bedeckt ist.

Digitized by Google

Die mannigfaltigen Verzweigungen, sowie die mäandrische Form dieser Wadis, giebt der Karte dieses Hochlandes das Ansehen eines von Blättern entblösten ästereichen Baumes, dessen Krone nach W. gekehrt ist. Im Norden fällt das Plateau plötzlich zu etwa 1000 Fuss mauerartig zur schauerlich öden Ahkaf-Wüste nieder, zu der man mehrere tiefe Schluchten hinabsteigt«[1]). Man erkennt aus dieser Schilderung unschwer solche Verhältnisse wieder, wie sie als Erosionserscheinung in Europa häufig beobachtet werden. Einen von diesem sehr entfernten Typus finden wir jedoch in folgender Schilderung eines Wüstenthales am Sinai: »Der Weg vom Uâdi Gharandel nach Uâdi Tayibe führt durch mehrere, mässig grosse runde Flächen, welche amphitheatralisch von nackten, weissgelben Felsen und Wällen von Sand und Gestein rings geschlossen sind. Viele von diesen steilen Kesselwänden ist man aus der Ferne für Menschenwerk zu halten geneigt. Sie schliessen die Arena in ihrer Mitte derartig ab, dass man sich wie Sinbad der Seefahrer im Diamantenthale vergeblich nach einem Ausgang umsieht. Zieht man weiter, so findet sich freilich überall nach einem mässigen Ansteigen der Ausweg. Wie der Faden in einem Rosenkranz von Kugel zu Kugel, so leitet der Weg von einer umwallten Rundfläche zur anderen. Jede Viertelstunde führt ein neues, freilich dem vorigen gleichendes abgeschlossenes Bild vor unsere Augen«[2]). Mit dieser geradezu klassischen Schilderung zeichnet uns Ebers das andere Extrem eines Wüstenthales, und zwar in der Form, wie sie im Wesentlichen durch das Wüstenklima und nur zum kleinen Theil durch Wassererosion geschaffen wird.

Zwischen den beiden, eben gezeichneten Extremen giebt es nun in der Wüste alle Übergänge. Bald überwiegen an einem Uâdi die Amphitheater und Circus, bald überwiegt die gewundene Erosionsrinne; bald wandern wir in einem Thal, das sich nur wenig von europäischen Thälern durch seine Form unterscheidet, bald befremden uns die überhängenden Steilwände und die kesselartigen Erweiterungen. Aus einer Wüstenkarte, auf der nur die vielver-

1) von Wrede, Zeitschr. d. Gesellschaft für Erdkunde zu Berlin. 1872, p. 234.

2) G. Ebers, Durch Gosen zum Sinai. 1872, p. 125.

Digitized by Google

zweigten Rinnsale eingetragen werden, in denen gelegentlich Wasser läuft und fast immer etwas Vegetation zu erblicken ist, kann man die Fremdartigkeit eines Wüstenthalsystems nicht recht herauslesen; wenn man aber auf die Terrainzeichnung achtet, wie sie SCHWEINFURTH[1]) auf seinen Karten mit solcher treffenden Sicherheit und Klarheit einträgt, dann muss es Jedem, der Karten zu lesen versteht,

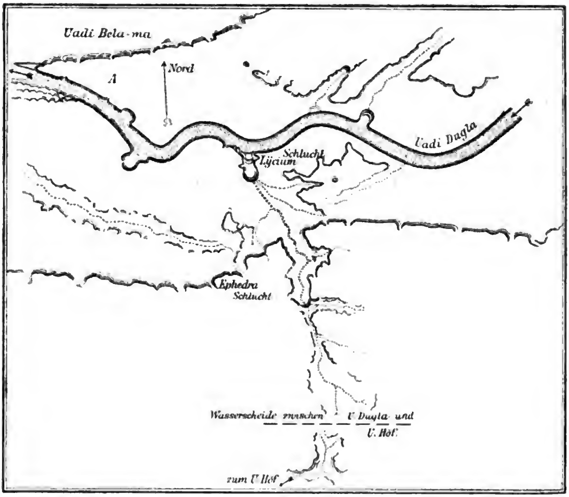


Fig. 32. Thalsystem des unteren Uàdi Dugla nach einer Originalaufnahme von G. SCHWEINFURTH.

auffallen, wie anders die Topographie eines Wüstenlandes ist gegenüber der eines europäischen Berglandes.

Wer sich ein Bild verschaffen will von diesen sonderbaren Thalformen, der reite von Cairo aus nach dem Uàdi Dugla, s. Fig. 32. Der Weg dahin führt an den Mamelukengräbern vorbei, über

1) Vgl. hierzu die Karten, Sitzungsber. der K. Acad. d. Wissensch. zu Berlin 1882. Tafel IV. Petermanns Mitth. Bd. 21, Tafel 19 u. a. m.

Digitized by Google

die Ruinen von Altcairo und dann über eine weite horizontale Kiesfläche, welche den Charakter einer Hamada besitzt durch die vielen scharfkantigen Kalksteinbrocken, welche mosaikartig dem Boden eingefügt sind. Zur Linken erheben sich die Steilwände des Mokkatam, nach Süden erblickt man die Wände des Djebel Turra, in welchem die Quadern für die Pyramiden von Giseh gebrochen wurden. Mitten in der Ebene erhebt sich, nur 3 m hoch, ein kleiner Zeuge als letzter Rest einer früher vorhandenen 3 m mächtigen Gesteinslage auf der Kiesebene. Das Uâdi Dugla mündet auf die Ebene und da, wo das Thal sich öffnet, erhebt sich ein steilaufsteigender Bergrücken *A* auf dem rechten Thalufer, der das Uâdi Dugla von dem Uâdi Bela-mâ trennt. Betrachten wir von der Höhe dieser Rampe das Uâdi, so fallen uns zuerst die steilen Gehänge desselben auf, dann aber sehen wir eigenthümliche Amphitheater oder Circusthäler in diese Gehänge hineindringen. Auf beifolgender Originalkarte G. Schweinfurth's sind vier solche Circusthäler sichtbar. Vergleichen wir die Lage derselben im Verlauf der Thalrinne, so erkennen wir deutlich, dass dieselben keinen Zusammenhang haben mit dem Wasserlauf, denn sie sind nicht etwa an der Aussenseite der Uâdikrümmungen, sondern an Orten vertheilt, welche bei Hochwasser keineswegs stärker durch Erosion angegriffen werden. Wir sehen aber zugleich, dass sie auch nicht durch Seitenbäche des Uâdi Dugla ausgewaschen sein können, denn erstens ist nirgends ein Wassereinschnitt in den überhängenden Felsen, zweitens ist das System von Nebenrinnsalen, welche an einem dieser Circus z. B. der Lyciumschlucht zusammenlaufen, viel zu unbedeutend, um die Form des tiefen Thalkessels mit seinen halbkreisförmigen Stufen zu erklären. Der unbefangene Beobachter muss sich sagen, dass die topographischen Depressionen von den Rinnsalen benutzt werden, aber nicht geschaffen worden sind. Hinter der Lyciumschlucht sehen wir ein zweites Circusthal und nach kurzer Strecke findet sich schon die Wasserscheide, so dass die hier zusammenfliessenden Wasser unmöglich so gross sein können, um solch' tiefe Schluchten von Kesselform auszugraben.

Solche Circusthäler oder Amphitheater sind aber keineswegs auf das Uâdi Dugla beschränkt, wir finden sie s. Fig. 32 in allen benachbarten Thälern und überall sehen wir, dass das erodirende Wasser nur secundär bei ihrer Bildung thätig sein

Digitized by Google

konnte, dass ihre Form durch andere Denudationskräfte bestimmt sein muss.

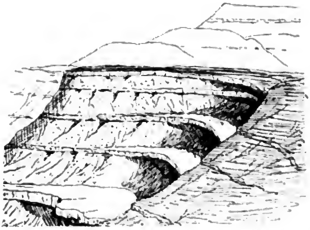


Fig. 33. Amphitheater am Nordabhang des Dj. Turra.

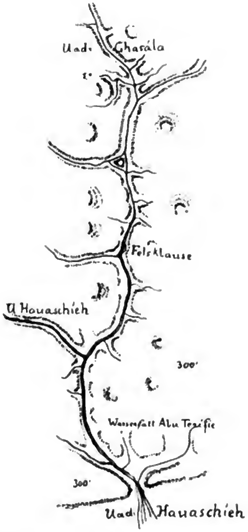


Fig. 34. Das untere Uâdi Hauaschieh (40 km NNW vom Dj. Gharib) nach einer Originalaufn. v. G. Schweinfurth.

Nicht nur die Profilgliederung der einzelnen Thalrinnen zeigt in der Wüste derartige Eigenthümlichkeiten — nein, auch der Verlauf der Thäler ist häufig wesentlich unterschieden von dem Verlauf der Thäler in regenreichem Klima.

Die Nebenthäler, welche bei uns in Europa in ein Hauptthal münden, vereinigen sich in der Regel unter einem spitzen Winkel mit diesem. Von diesem Gesetz findet man in der Wüste auffallend häufige Ausnahmen. Beifolgende Fig. 34 ist die Copie einer handschriftlichen Karte G. Schweinfurth's des Uâdi Hauaschieh, 40 km NNW vom Dj. Gharib. Betrachtet man aufmerksam die Verästelung der Thäler, so erkennt man, dass die Mehrzahl der Nebenthäler unter einem rechten Winkel, viele sogar unter

Digitized by Google

einem stumpfen Winkel in das Hauptthal münden. Und diese Erscheinung steht keineswegs vereinzelt da, sondern sie lässt sich oft in der Wüste beobachten, wenn man sein Augenmerk mehr auf die Configuration der Thäler als auf den Verlauf der eigentlichen Wasserrinne in der Thalsohle richtet.

Aber selbst in jener grossen Zahl von Fällen, wo ein Uâdi mit seinen tiefeingeschnittenen Wänden und vielfach verästelt mit seinen Seitenthälern in der Kartenprojection auch ganz den Charakter eines europäischen Erosionsthales hat, so lässt sich selbst dann oft in den Wüstenthälern ein grundlegender Unterschied bemerken:

Das Längsprofil eines Erosionsthales bildet eine Curve, welche anfangs nur schwach geneigt ist, sich dann immer steiler eingräbt und dann sich allmählich der Horizontalen nähert. Ein echtes Wüstenthal beginnt an seiner Ursprungsstelle mit einer Steilwand. Das Uâdi Omm Chûrm in der südlichen Gal̦âla hat mir in dieser Beziehung den tiefsten Eindruck hinterlassen. Wir standen am Rande eines mehr als 1000 Fuss tiefen Abgrundes, blickten hinab auf die Sohle des Uâdi, das mit grünen Punkten gesprenkelt war, zwischen denen sich kleine schwarze Punkte wimmelnd bewegten. Es waren hunderte kleiner Beduinenziegen, welche da unten an saftigen Wüstenkräutern herumfrassen. Dann sahen wir das Uâdi gegen Süden sich mit gleichbleibender Steilheit in das Galâlaplateau hineinschneiden und nirgends war eine Stelle zu sehen, an welcher der kühne Fuss eines Bergsteigers heraufzuklettern vermocht hätte.

Professor Schweinfurth erzählte mir vom Uâdi Rischrâsch, welches bei Atfih in das Nilthal mündet, dass er drei Tage lang in das Uâdi eingedrungen sei, ohne irgendwo eine Stelle zu finden, an der man die 300 Fuss hohen Felsen hätte erklimmen können. Der Reisende musste auf demselben Weg wieder herausreiten, da sich nirgends eine Möglichkeit ergab, aus dem Uâdi auf das Plateau zu kommen.

Dem unbefangenen Beobachter wird es nicht entgehen, dass wir in der Form dieser Wüstenthäler dieselbe Erscheinung, nur spiegelbildlich umgekehrt, wiederfinden, welche als Tafelberg, Zeuge und Treppenstufenland in der Wüste bekannt ist. In beiden Fällen handelt es sich darum, dass die denudierenden Kräfte nicht an die Bahnen gebunden sind, welche die Schwerkraft dem fliessenden

Digitized by Google

Wasser vorzeichnet, sondern dass der wirbelnde Wind es ist, der überall denudiert, selbst an Stellen und unter Bedingungen, wo fliessendes Wasser machtlos sein würde.

Selbst für die Erosionsschluchten in unseren Tafelländern nimmt v. Richthofen[1]) eine Mitwirkung der »atmosphärischen Erosion« an bei der Ausgestaltung der Terrassen und Thalrinnen; wieviel mächtiger ist die Wirkungsweise dieser äolisch denudierenden Kräfte in einem Wüstenland, wo es so selten regnet. Und wenn wir a. a. O. lesen: je weiter man am Hauptfluss und seinen Nebenflüssen aufwärts geht, desto mehr treten stufenweise die oberen Terrassen auseinander, weil das steilere Gefälle und damit die stärkere Tiefenerosion sehr allmählich nach rückwärts fortschritt, daher hier hinreichende Zeit für grössere Ausweitung des Flussthales gegeben war — so gilt dies nicht für die Thäler der Wüste, wo das Gefälle am Ursprung der Thäler am stärksten ist, ja oft auf die Ursprungsregion beschränkt erscheint.

Denn eine eigenthümliche Erscheinung in der Configuration der Wüstenthäler ist es, dass dieselben eine ungemein gleichmässige Sohle haben. Gewöhnlich wird die Sohle eines Uâdi auf weite Erstreckung hin von ein und derselben Felsbank gebildet. Wiederum treffen wir auf dieselbe Erscheinung, die uns schon bei den Tafelbergen und Zeugen überraschte, dass die Form der Berge und Thäler durch härtere Bänke bestimmt wird, welche dort die Krönung des Tafelberges, hier die Sohle des Uâdi bilden.

In diesen Bildern haben wir den Gegensatz von Erosion und Deflation, von der Thätigkeit des Wassers und des Windes.

Nochmals aber möchte ich darauf hinweisen, dass beide Erscheinungen in der Wüste combiniert auftreten, dass sie sich ablösen und ergänzen und dass man daher bei der Erklärung der Berg- und Thalformen immer beiden Factoren Rechnung tragen muss.

Den letzten und augenscheinlichsten Beweis aber für die Ansicht, dass bei der Bildung der Wüstenthäler das erodierende Wasser eine untergeordnete Rolle spielt, erblicke ich in Erscheinungen, wie sie beifolgende Skizze Fig. 35 von G. Schweinfurth wiedergiebt. Das Uâdi Habīb ist eine Schlucht, welche etwa 100 Fuss tief und 200 Fuss

1) Führer f. Forschungsreisende. p. 163 Anmerk.

Digitized by Google

breit ist. Eingesenkt in geschichtete Kalke ist es in eine weite Fläche mit steilen Wänden eingeschnitten. Kurz vor der Einmündung desselben in das Uâdi Siut erhebt sich aus der Thalsohle eine Säule von gewaltigen Dimensionen und ist auf den ersten Blick als ein Theil des Kalkfelsens zu erkennen, der inselartig zwischen den beiden Thalwänden bis zum Niveau der Oberfläche stehen blieb. Dieser Pfeiler würde sich unmöglich haben erhalten können, wenn die Form des Thales wesentlich durch fliessendes Wasser bestimmt worden wäre. Denn das auf der Sohle des Thales sich allmählich eingrabende Wasser hätte ihn längst durchgesägt und unterwühlt. Die Existenz dieses Pfeilers lehrt uns vielmehr, dass die Hauptmasse des Thalvolumens durch Deflation heraustransportiert wurde, dass nur zum geringen Theil erodierendes Wasser dabei wirksam war.

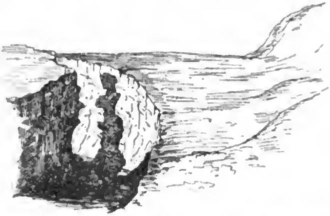


Fig. 35. Felspfeiler im Uâdi Habîb kurz vor dessen Einmündung in das Uâdi Siut, nach einer Federzeichnung von G. Schweinfurth.

So finden wir, dass in der Wüste die denudierende Wirkung des Windes an Kraft und Leistung die erodierende Thätigkeit des Wassers um Bedeutendes übertrifft, dass bei der Bildung der Uâdi in der Felswüste die Deflation eine hervorragende Rolle spielt.

Noch verwickelter aber wird das Problem der Uâdibildung in einer dislocierten Landschaft. Hier ist in erster Linie die tectonische Gliederung massgebend für die Gestaltung der Oberflächenformen.

Am Sinai ist, wie Fraas[1]) hervorhebt, »besonders auffallend die verkehrte Erosionsgestalt der Wadis. Steil und senkrecht, wie Eine Felsenwand steht das Gebirge vor dem Reisenden, der vom Rothen Meere herkommt, die Mündung der tiefen Thäler versteckt sich in

1) Aus dem Orient, p. 31.

Digitized by Google

einer Weise, dass man erst unmittelbar davor den Eingang bemerkt, als enge und tiefe Schlucht. So eng als das Thal des Dreisam zwischen dem sogenannten Himmelreich und Höllensteig, ist die Schlucht des Wadi Hebrân bei seiner Mündung zur Rothen Meer-Wüste; je weiter man ins Innere des Gebirges eindringt, um so breiter und weiter wird es, ohne dass der Grund für diese Erscheinung etwa in der Beschaffenheit des Gesteins, das hier leichter als dort verwitterte, gefunden werden konnte. Dasselbe Verhältniss zeigt das Feirân, enge Schluchten bei seinem Ende, weite Wadis in seinen Anfängen, die kaum merklich mit anderen ebenso flachen Wadis zusammenhängen.« Ich habe schon in den »Korallenriffen der Sinaihalbinsel« darauf hingewiesen (S. 448), wie dieses Phänomen sich erklärt. Ein Blick auf die jener Abhandlung beigegebene geologische Karte lehrt, dass die Westküste der Sinaihalbinsel durch Dislocationslinien gegegliedert wird, welche SO—NW verlaufen. Das mittlere und obere Uâdi Feirân läuft im Streichen der Schichten, ungefähr auf der Grenze von Stockgranit und Lagergranit plus Nubischem Sandstein. Der Unterlauf des Uâdi läuft senkrecht zum Streichen und wird, wie die Beschaffenheit der Schichten (s. Korallenriffe Fig. 5) an der Mündung des Uâdi lehrt, durch eine Verwerfungslinie bedingt, welche als »Blatt« die Schichten kreuzt. Dass hier quer zum Streichen der Schichten die Breite des Uâdi geringer sein muss, als im Oberlaufe desselben, ist leicht verständlich. Ähnlich liegen die Verhältnisse im Uâdi Hebrân, dessen Unterlauf ebenfalls senkrecht zum Streichen der grauen Lagergranite läuft, während sein Oberlauf einer jener kesselartigen Erweiterungen entspricht, wie ich sie im Anfang vorstehenden Abschnittes besprochen habe.

Die Mannigfaltigkeit derartiger, durch Dislocationen beeinflusster und von dem vorhin gegebenen Schema dadurch abweichender Uâdibildungen ist so gross, dass ich diesen Abschnitt über Gebühr ausdehnen müsste, wollte ich alle die verschiedenen Fälle und Möglichkeiten besprechen, Möglichkeiten, die nicht etwa eine bloss theoretische Existenz haben, sondern die ich selbst beobachtet habe. Alle diejenigen Schichtenveränderungen, die wir als isoclin, anticlin, synclin kennen, gerade und gebogene, continuirliche und unterbrochene Verwerfungen geben Anlass zur Uâdibildung und erzeugen jene Fülle von verschiedenen Thalformen, die man in der arabischen Wüste

Digitized by Google

beobachten kann. Berücksichtigt man weiter, welche Combinationen sich dadurch ergeben, dass bald mehr die Erosion lange Rinnen wühlt, bald die Deflation Circus und Amphitheater ausgräbt, dass das Gesteinsmaterial nach Härte und Weichheit, das Auftreten oder der Mangel der schwarzen Schutzrinde, Sandgebläse und Insolation in dem Wettbewerb der wüstenbildenden Kräfte thätig sind, dann mag man sich eine Vorstellung davon machen wie schwierig es wird, die Vorgänge ins Einzelne zu verfolgen und ihre Wirkung gegeneinander abzuschätzen.

Aber darauf muss ich nochmals nachdrücklich hinweisen: das erodierende Wasser spielt bei allen diesen Vorgängen zwar eine Rolle, aber eine untergeordnete. Es regnet in der Wüste nur einmal im Jahr, aber die Sonne scheint täglich und der Wind eilt täglich über Berg und Thal. Kräfte, die in unseren Breiten kaum zur Geltung gelangen, spielen in der Wüste eine tonangebende Rolle und wir haben nicht nöthig hypothetische Wasserfluthen zur Erklärung räthselhafter Wirkungen anzunehmen, wenn wir so räthselhafte, ungewohnte Kräfte alltäglich wirken sehen.

Um in zusammenfassender Weise die Vorgänge darzustellen, welche bei der Denudation eines Gebirgslandes in der Wüste thätig sind, brauche ich nur diejenigen Bilder aneinander zu reihen und als Typen eines fortlaufenden Entwicklungsprocesses darzustellen, welche man nebeneinander überall in der Wüste leicht beobachten kann. (Dass ich hierbei im Folgenden einen theoretischen Fall zur Vorlage nehme, dürfte damit zu begründen sein, dass Specialkarten der arabisch-ägyptischen Wüste fast nur in den Originalblättern Professor Schweinfurth's existiren, und dass die Nomenclatur der Berge in der menschenleeren Wüste so spärlich ist, dass ich für meine Beispiele keine Namen anzugeben wüsste. Jeder der selbst in der Wüste gereist ist, wird diese Schwierigkeiten zu würdigen wissen.)

Versuchen wir also, den einfachsten Fall eines ungestörten Tafellandes als Grundlage wählend, uns den Vorgang darzustellen, der sich bei der Denudation eines solchen in der Wüste vollzieht. Es handelt sich hierbei nicht etwa um eine hypothetische Speculation, sondern wir haben nur die verschiedenen Denudationsbilder, die man in der Wüste nebeneinander beobachtet, als Stadien eines fortlaufenden Entwicklungsprocesses aneinander zu reihen.

Digitized by Google

Eine Hamada bestehe aus fünf übereinander zu Tage tretenden Schichten. Zu unterst s. Fig. 36 eine Mergelbank *E* von beliebiger Mächtigkeit. Darauf liege eine feste Kalkbank *D* einen Meter dick, dann folgen 20 m Mergel = *C*, dann abermals eine feste Kalkbank *B* und endlich nochmals eine Mergelschicht *A*. Ohne Verwerfungen und mit sanft abgeböschten Gehängen erstrecke sich diese Schichtenreihe über eine mehrere Meilen weite Fläche.

Sobald die wüstenbildenden Kräfte auf diesen Gesteinscomplex zu wirken beginnen, wird zuerst der Wind die Mergelschichten *A*,

Fig. 36. Äolische Abtragung eines Tafelgebirges in der Wüste I. Stadium.

welche durch Insolation, Verwitterung und Sandgebläse gelockert wurden, allmählich entführen und die Hamada zu einem Tafellande umgestalten. Zu gleicher Zeit wird der Wind die zu Tage tretenden Schichtenköpfe von *C* denudieren, abermals unter Mitwirkung aller übrigen Wüstenkräfte. Es wird dadurch das Profil des Plateauabfalls ein anderes. Die Mergel *C* unter der festeren Kalkbank sind jetzt das Einzige, das die Deflation intensiv zu zerstören vermag. Die Fläche der Bank *B* bietet diesen Kräften einen nachhaltigeren Widerstand (s. Fig. 37).

Fig. 37. Äolische Abtragung eines Tafelgebirges in der Wüste II. Stadium.

Aber wenn die Deflation diese Bank auch nicht von oben herein zerstören kann, so beginnt sie die Bank zu unterminieren, und wenn erst eine Hohlkehle unter der Bank geschaffen ist, wenn hier die Verwitterung im Schatten den Deflationsprocess unterstützt, dann dauert es nicht lange, bis die Bank *B* soweit überragt, dass sie herabbrechen muss und dass ein Haufen grober Felsblöcke am Fusse der Bergwand (s. Fig. 38 u. Fig. 96) sich findet. Bei dem Herabbrechen

Digitized by Google

dieser Kalkbank wird sich leicht ergeben, dass an einzelnen Stellen dieser Vorgang leichter erfolgt als nebenan, und dass demzufolge aus der Vogelperspective gesehen die ganze Hamada einen eingebuchteten Umriss erhält. Auch diese Erscheinung kann man häufig in der

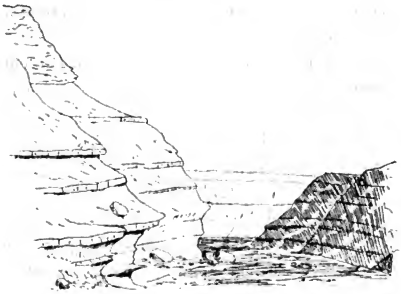


Fig. 38. Deflation im Uâdi Dugla.

Wüste beobachten (s. Fig. 38 u. 39). Man sieht sogar oft, dass diese Buchten des Umrisses eines Tafelberges als kleine, kurze, blind endende Thäler

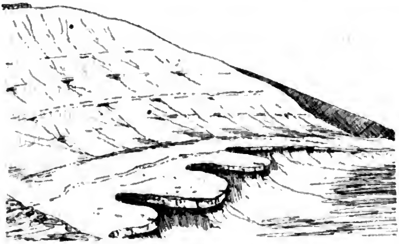


Fig. 39. Der Radiolitenkessel bei Abu Roasch. Links oben Fundamente der nördlichsten Pyramide, rechts im Hintergrund ein für den Bau derselben aufgeschütteter Damm.

in das Tafelland hineindringen, eine Erscheinung, welche durch den gelegentlich fallenden Regen nicht bedingt, aber unterstützt wird. In diesen kurzen Thalgassen ist die denudierende Thätigkeit infolge der

Digitized by Google

Verwitterung eine grosse. Ich lag eines Mittags nahe bei Râs Abu Senîme in einer solchen blind endenden Schlucht und konnte verfolgen, wie die Sonne allmählich an der Mergelwand vorrückend, einen Theil nach dem anderen beschien. Sobald ein Theil der Uâdiwand von der Sonne getroffen wurde, dann lösten sich auch sogleich einige Mergelstückchen infolge der Erwärmung ab und bröckelten längere Zeit hindurch zu Boden.

Durch andere Factoren wird dieser Vorgang wesentlich unterstützt. Die Mehrzahl der Felsen in der Wüste ist marinen Ursprungs und enthält grosse Mengen von Salz. Dieses Salz im Gestein spielt in der Wüste dieselbe Rolle, wie der Spaltenfrost in unseren Gebirgen. Das Salz ist sehr hygroskopisch und vermag selbst geringe Spuren Feuchtigkeit aus der Luft anzuziehen — eine Salzthonfläche (Sebcha) ist selbst bei trockener Luft feucht und schwierig zu begehen, weil der Fuss leicht ausgleitet. Diese überall im Gestein vertheilten Salzmengen befeuchten während der Nacht die Felsen, und wenn dann am Tag die Sonne darauf scheint und oberflächlich die Feuchtigkeit wieder ausgetrieben wird, dann verändert sich das Volumen der Gesteinsrinde, es bilden sich Sprünge, Verzerrungen, Blätter, und leicht bröckeln die oberen Schichten ab. Dieser Vorgang vollzieht sich täglich, oft wiederholt, und man muss ihm eine grosse Rolle im Wechselspiel der denudierenden Wüstenkräfte beimessen.

Zwar werden nur weiche Schichten von diesem eben geschilderten Vorgang betroffen, allein indirect beeinflusst derselbe auch härtere eingeschaltete Bänkchen. Sie werden aus den weicheren Schichten herausmodelliert, und bald so weit untergraben, dass sie den Halt verlieren und ebenfalls abbrechen und zu Boden fallen. Dort bemächtigen sich ihrer andere Kräfte, die bei Schilderung der Kieswüste ausführlich besprochen werden sollen, und bald ist nur noch ein Häufchen Staub übrig, das der Wind leicht davonträgt.

Dieser Vorgang, den ich im Laufe einer Viertelstunde ganz erhebliche Gesteinsmassen ablösen sah, vollzieht sich täglich und Jahre hindurch, und erweitert das kleine Thal immer mehr. Der zu Boden gefallene Mergel wird dort durch die Sonnenstrahlen zerkleinert, er zerfällt in immer kleinere Stückchen so lange bis diese klein genug sind, um vom Wirbelwind erfasst und aus der Schlucht herausgetragen zu werden. Abermals stürzt die Kalkbank *B* soweit sie

Digitized by Google

überragt hinab, und wenn auch die Deflation diese gröberen Blöcke nur wenig anzugreifen vermag, so nagt sie doch auch an ihnen, und

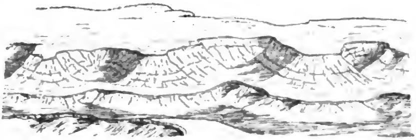


Fig. 40. Kalkterrassen im Osten des grossen versteinerten Waldes.

sobald einmal ein Gewitterregen hernieder stürzt, dann transportiert er die Blöcke heraus, und allmählich werden sie doch zerkleinert, wie ich im folgenden Abschnitt noch auszuführen habe. So wird das Tafelland von allen Seiten an- und ausgefressen s. Fig. 40, 41; kleine Uâdis dringen hinein, und es entsteht ein Umriss, wie die

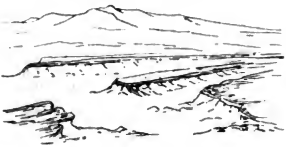


Fig. 41. Djebel Ajuhss nach Schweinfurth, Petermanns Mitth. Bd. XXI, 19.

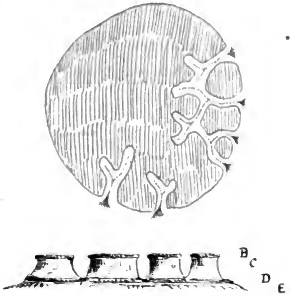


Fig. 42. Äolische Abtragung eines Tafelgebirges in der Wüste III. Stadium.

beifolgende Fig. 42 zeigt, doch fast ohne die Mitwirkung erodierenden Wassers.

Immer tiefer nagen sich die kleinen Uâdis, sie verästeln sich, sie vertiefen sich, aber ihre Grundfläche bleibt immer die Kalkbank *D*, ihre Wände werden von dem Mergel *C* gebildet und nach oben wird die Bergmasse abgeschlossen durch die Bank *B*. Das Wasser

Digitized by Google

transportiert aus den Uâdis die groben Blöcke heraus, aber die Hauptleistung vollziehen äolische Kräfte.

Auf einem späteren Stadium s. Fig. 42 sehen wir auf dem Profil eine Zeugenlandschaft, in der Vogelperspective erblicken wir das Tafelland

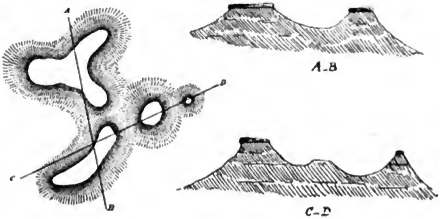


Fig. 43. Projection und Profile einer Zeugengruppe Kef-el-Gara nach Mission de Chadamès Fig. XVII, p. 258.

in ein mittleres Tafelgebirge und vorgeschobene Zeugen zerlegt, und schon bilden sich hydographische Abflussrinnen zwischen den Zeugen.

Fig. 44. Äolische Abtragung eines Tafelgebirges in der Wüste IV. Stadium.

Aber der Deflationsprocess geht noch immer weiter. Die freistehenden Zeugen bieten der Denudation geringeren Widerstand als die mittlere Tafelmasse und einer nach dem anderen verschwindet s. Fig. 43. Endlich ragt s. Fig. 44 aus der weiten durch die Bank *D* gebildeten Wüstenebene noch ein einzelner mittlerer Zeuge heraus, der letzte Rest einer früher weit ausgedehnten Schichtendecke. Der Zeuge wird infolge stärkerer Verwitterung an der Schattenseite schief s. Fig. 45 und unregelmässig, auf der Nordseite wird die schützende Kalkplatte stärker untergraben, sie bricht endlich

Fig. 45. Zeuge im Uâdi Guerraui.

herab und bald verschwindet auch der letzte »Zeuge« einer früher weitausgedehnten Gesteinsschicht und eine Ruhepause tritt ein in der Abtragung des Landes, denn die Kalkbank *D* widersteht energisch und lange den Angriffen der wüstenbildenden Kräfte. Sobald es ihnen aber gelungen ist, irgendwo ihr Werk am Rand und unter

Fig. 46. Schuttkegel an einem Hügel am SO-Ende des Mokkatam gegen das Plicatulathal.

der Kalkschicht in dem Mergel *E* anzufangen, dann beginnt der Denudationsprocess aufs Neue, abermals entsteht eine Zeugenlandschaft mit Circusthälern, und abermals wird auch diese abgetragen und eine weite Kieswüste gebildet.

Als Gegenstück zu der eben geschilderten Zeugenbildung und Denudation in einer undislocierten Tafellandschaft will ich jetzt noch kurz die Denudationsvorgänge in einem complicirteren, durch Dislocationen verwickelteren Gebiete schildern. Auch hier brauche ich nur das aneinander zu reihen, was ich nebeneinander in der Wüste häufig beobachtet habe, und zwar dienen mir hier als Grundlagen die

Fig. 47. Dislocierte Kreidekalke bei Abu Roasch.

Beobachtungen vom Djebel el Gaâ, NW von Abu Roasch s. Fig. 47, und vom Djebel Súffr s. Korallenriffe Fig. 11 und einigen anderen Bergen am Sinai.

Nehmen wir an, dass der Aufbruch des Dj. Súffr nicht nur Sandstein, Kreidemergel und Nummulitenkalk, sondern auch den unter dem Sandstein liegenden Granit zu Tage gebracht hätte, so würde

Digitized by Google

ein schematisches Profil durch den Dj. Súffr folgendes Bild bieten: Fig. 48. Die Einwirkung der denudierenden Kräfte in der Wüste auf die in kleinem Raum hier zusammen vorkommenden Gesteine wird nach ihrer Härte eine sehr verschiedene sein.

Der Granit wird schalig zerspringen und zu lockerem Feldspathquarz-hornblende-grus zerfallen (s. u. Entstehung des Wüstensandes). Der Wüstenwind wird die durch Insolation immer mehr zerkleinerten Fragmente des leichter zerstörbaren Feldspathes rasch entführen. Quarz- und Hornblendesand bleibt zurück. Der Sandstein beiderseits

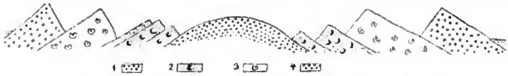


Fig. 48. 1. Granit. 2. Sandstein mit Manganknollen. 3. Kalk mit Ammoniten. 4. Kalk mit Nummuliten.

von dem Granit wird sich theilweise mit schwarzer Schutzrinde umgeben und dadurch sehr resistent werden, theilweise wird er zerstört und zerfällt ebenfalls zu Quarzsand. Die Kreideschichten werden je nach ihrer Härte verschieden stark angegriffen, aber da sie nicht

Fig. 49. Schichtenköpfe von Kreidekalk bei Abu Roasch.

nach oben durch eine feste Decke geschützt sind, und die schräg einfallenden Schichten der Deflation keinen grossen Widerstand leisten können, werden sie zu kleinen Hügeln mit einzelnen härteren Bänken abgeschliffen, wie man an den Kreidebänken bei Abu Roasch s. Fig. 49 vortrefflich beobachten kann. Die verkieselten Exogyren und Korallen sind widerstandsfähiger als das umgebende Gestein und werden übrig bleiben, wenn dieses auch zerstört wird, der Nummulitenkalk endlich wird in ähnlicher Weise zerstört und die härteren

Digitized by Google

Nummuliten liegen als Kies in der Wüste offen zu Tage. Ist dieses Ziel erreicht (Fig. 50), ist die vorher vielgestaltige Stelle eingeebnet worden, dann ruht die Deflation und nur die Bildung eines Wasserrisses oder neue Dislocationen werden neuen Anlass geben zu neuen Denudationsvorgängen.

Stapff hat ganz Ähnliches in Südafrika beobachtet, wenn er[1]) schreibt: »Endresultat der Winderosion sind flache Rundhöcker, von

Fig. 50. Denudationsebene in der Wüste, durch Deflation entstanden aus dem Hügelland Fig. 48.

Gletscherhöckern nur durch rauhere Oberfläche, den Mangel an Riefen und das Fehlen scharfer Leeseiten unterschieden. Heisses Klima mit kühlen Nächten trägt wesentlich durch Abschalen und Zerbröckeln des Gesteins zu ihrer Bildung bei.«

3. Die Uâdischotter.

Wir haben schon mehrfach darauf hingewiesen, dass der Regen in der Wüste zeitlich und örtlich begrenzt ist. In unseren Breiten dürfen wir annehmen, dass nahe bei einander liegende Gebiete annähernd gleich viel Regen jedes Jahr erhalten und dass sich dieser Regen gleichmässig auf das gesammte Areal vertheilt. Die Fläche, welche in einem Monat mehr Regen als eine benachbarte erhalten hat, bekommt dafür in dem nächsten Monat weniger, so dass die Regenmenge benachbarter Gebiete, wie uns die Betrachtung jeder Regenkarte lehrt, als annähernd gleich geschätzt werden darf.

In der Wüste fällt selten Regen, dieser Regen tritt als Strichregen auf und dadurch ist es bedingt, dass nahe beieinander liegende Gebiete ganz verschieden grosse Mengen Niederschlag erhalten. Diese Erscheinung wurde mir ganz besonders einleuchtend vor Augen geführt bei meiner Reise durch die südliche Sinaihalbinsel. Am 5. April 1887 erlebte ich im Uâdi Mbel einen heftigen Gewitterregen, der binnen kurzer Zeit die trockene Thalsohle 20 cm hoch mit Wasser füllte. Das Wasser verlief ebenso rasch, als es gekommen war.

1) Verh. d. Ver. f. Erdkunde zu Berlin 1887, p. 49.

Digitized by Google

Am folgenden Tage kreuzte ich von Uâdi Mbel bis Uâdi Timân eine grosse Anzahl von Thalrinnen und hatte Gelegenheit zu vergleichen, in welchem Maasse dieselben vom Wasser betroffen worden waren. Hierbei zeigte es sich, dass nahe beieinander liegende Thäler ganz verschieden stark bewässert worden waren, in dem Einen war Alles überschwemmt gewesen, gelber Schlamm überzog alle Steine, Salsulabüsche waren ausgerissen und weit verschleppt, kleine Wasserpfützen waren noch sichtbar, in dem nächsten Thal war Alles trocken und keine Spur rinnenden Wassers zu beobachten. Beduinenfamilien mit hunderten kleiner Ziegen und Schafe begegneten uns, um die überschwemmten Thäler aufzusuchen, da dort binnen wenigen Tagen eine üppige Vegetation emporspriessen musste.

Die Regen in der Wüste haben ein ähnlich begrenztes Verbreitungsgebiet wie die Hagelschläge in unseren Breiten, und wie diese, üben sie ihre Wirkung auf zeitlich und örtlich begrenztem Raum.

Nun ist die Erosion eine unmittelbare Folge des Regens und in ihren Wirkungen an die Verbreitung desselben gebunden, in der Wüste mehr als bei uns. Denn der Wüstenboden ist ausgetrocknet, beständig rinnendes Wasser ist selten und noch seltener erreicht es das Meer. In mehreren Uâdis der Sinaihalbinsel trifft man rinnendes Wasser (Uâdi Tayibe, Uâdi Feirân, Uâdi Hebrân etc.), allein dasselbe versiegt, ehe es das Meer erreicht. Ebenso ergeht es dem Wasser, das bei Gewitterregen die Uâdi erfüllt. Es wird rasch vom ausgedorrten Boden absorbiert und kann nur auf kurzen Strecken erodierend wirken.

Wir sehen also, dass die erodierende Kraft in der Wüste zeitlich und örtlich eng begrenzt wird, dass jeder Regen ein neues, anderes Verbreitungsgebiet hat, und demzufolge auch seine Erosionswirkungen verlagert.

Die Erosion besteht darin, dass fliessendes Wasser Gesteinsbrocken losreisst, rollt und abrundet, die Sohle des Thales damit bearbeitet und die Gerölle da ablagert, wo seine transportierende Kraft erlahmt. Alle diese Erscheinungen müssen daher in der Wüste local begrenzt sein, sie müssen in benachbarten Thalsystemen sich verschieden verhalten, sogar im Verlauf ein und derselben Thalrinne in ihrem Verhalten wechseln.

Digitized by Google

Wer diesen Gedanken im Auge behält, wer sich der erwähnten Thatsachen stets erinnert, der wird sich über die sonderbare Vertheilung der Erosionsproducte in den Wüstenthälern nicht wundern, der wird keine der Wüste fremden Kräfte zu Hülfe nehmen, um sich Rechenschaft zu geben über das sonderbare Auftreten der Schottermassen in der Wüste.

Aber es muss noch Eins in Rechnung gezogen werden. Bei uns in einem regenreichen Klima ist die Wirkung der Erosion auch insofern vom fallenden Regen abhängig, als er die Erosionsproducte bilden hilft. Der Regen dringt in die Felsen, löst chemisch und mechanisch den Verband des Gesteins und derselbe Regen trägt die gelockerten Steine zum Thal hinab, und rollt sie in der Thalsohle weiter. Es werden also durch den Regen die Erosionskraft und die Transportkraft geliefert und gleichzeitig die zu transportierenden Massen gebildet. In der Wüste regnet es so selten, dass die Lockerung und Zerkleinerung des Gesteins durch das fallende Wasser in ganz untergeordneter Weise vollzogen wird. Andere Kräfte, welche im Gegensatz zum seltenen Regen, Tag und Nacht, Jahr aus Jahr ein wirksam sind, lockern die Gesteine. Die Verwitterung, die Zerbröckelung des salzhaltigen Gesteins, die Wirkung der Insolation, das sind die Kräfte, welche Gesteinsbrocken bilden, welche das Material liefern, das die Erosion dann übernimmt, die selbst da noch thätig sind, wo die Kraft des fliessenden Wassers erlahmt.

Infolgedessen kann die Kraft des fliessenden Wassers ganz als Transportmittel ausgenutzt werden, an Gesteinsbrocken ist kein Mangel, alle liegen locker aufeinander und erwarten den ersten Regen, der sie leicht davonträgt.

Daraus erklärt sich jene überraschende Wirkung der Erosion in der Wüste. Wir sehen ungeheuere Massen von Erosionsproducten aufgehäuft, und schliessen aus der Analogie europäischer Verhältnisse, dass ungeheuere ungewohnte Erosionskräfte hier thätig gewesen sein müssen, ohne zu bedenken, dass das fliessende Wasser in der Wüste nur die vorhandenen Gesteinsbrocken abrundet und transportiert, und seine ganze Kraft auf diese Leistung concentrieren kann, während bei uns die Kraft des fliessenden Wassers beim Eingraben in den Boden, beim Lockern von Steinen schon zum Theil verbraucht wird und ein anderer bedeutender Antheil durch die

Digitized by Google

Widerstände verloren geht, welche die Vegetationsdecke fast überall dem fliessenden Wasser entgegensetzt. Bedenken wir aber, dass in der Wüste keine Vegetationsdecke den Boden verhüllt, dass eine Anzahl anderer Kräfte die Gesteine zerkleinern, dass die Erosion nur zu transportieren hat, und auf diese Thätigkeit ihre ganze Leistungsfähigkeit concentrieren kann — so wird uns die seltsame Anhäufung von Flussgeröllen in vielen Uâdis kein Räthsel mehr sein, wir werden nicht mehr Veranlassung haben, zu ihrer Erklärung gewaltige Wasserfluthen, wie sie der Wüste fremd sind, zu Hülfe rufen zu müssen.

Als 1 bis 10 m hohe Mauern sehen wir Schotterterrassen an den Gehängen mancher Wüstenthäler angehäuft, bunt durcheinander gewürfelt liegen s. Fig. 27 faustgrosse und metergrosse Blöcke in einem

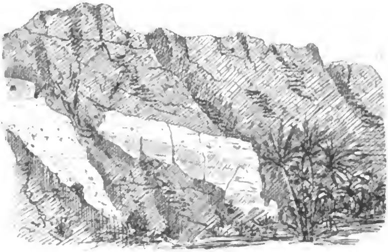


Fig. 51. Schottersedimente an den Gehängen des Uâdi Feirân.

feinsandigen Cäment, bald abgerollt und vollkommen gerundet, bald mit schärferen Kanten versehen. Kein Wunder, wenn manche dieser Schottergebilde als Moränen betrachtet und beschrieben worden sind. Hoch ziehen sie sich an den Thalgehängen empor s. Fig. 51, und wenn wir aus der Analogie europäischer Verhältnisse ihre Bildung erklären wollten, so müssten wir räthselhafte Kräfte annehmen. Und doch ist die Erscheinung einfach und leicht verständlich, wenn wir bedenken, dass wir uns in der Wüste befinden und wenn wir im Auge behalten, dass das Wüstenklima eine Reihe von Erscheinungen im Gefolge hat, die, gewaltig in ihrer Kraftleistung, auf einfache Factoren zurückgeführt werden können. Wir brauchen weder Eis noch Meeresbrandung noch Sintfluthregengüsse anzunehmen — wir

Digitized by Google

müssen nur sorgfältig studieren, welche Vorgänge sich heute noch in der Wüste abspielen, müssen uns versenken in das mannigfaltige Wechselspiel der wüstenbildenden Kräfte, dann finden wir auch die Lösung des Räthsels. Und endlich müssen wir Folgendes im Auge behalten. Die Schottermassen haben in den Wüstenthälern eine überaus sonderbare Vertheilung. Im oberen Uâdi Feirân bis zum Hügel el Meharret sind sie überall grossartig entwickelt, im Unterlauf des Thales fehlen sie vollkommen. Das Gleiche gilt vom Uâdi Hebrân, und was noch eigenthümlicher ist, benachbarte Wasserläufe haben viel oder gar keine Schotterterrassen. Wenn man diese scheinbar regellose Vertheilung des Schotters richtig würdigt, dann wird man von selbst auf die Vermuthung geleitet, dass die verschiedenen Schottergebilde nicht eine gleichzeitige Wirkung allgemein verbreiteter Ursachen, sondern eine locale, zeitlich begrenzte Wirkung local thätiger Kräfte war, dass mit anderen Worten die Schotter der verschiedenen Thäler nicht gleichzeitige Bildungen sind. Indem wir aber dieses bedenken, dann fühlen wir uns auch nicht verleitet, eine allgemeine »pluviatile Periode«[1]) für die gesammte Wüste anzunehmen, sondern wir erkennen, dass die in verschiedenen Thälern isolierten, zu verschiedenen Zeiten gebildeten, umgelagerten und transportierten Schottermassen keinen Schluss gestatten auf universell gesteigerte Erosionskräfte.

Endlich muss ich eines Factors gedenken, dessen Bedeutung für die Anhäufung von Erosionsproducten ich hier nur andeuten kann, indem ich die Ausführung des Gedankens an einer anderen Stelle versuchen werde. Einen hervorragenden Einfluss auf die Masse eines sich bildenden Sedimentes haben tectonische Bewegungen. Durch Dislocationen werden die Felsen zerklüftet, und der erodierenden und transportierenden Thätigkeit des Wassers eine grössere Zahl von Angriffspunkten geliefert. Ein ebenes Tafelland, welches der Erosion kaum eine Angriffsstelle bietet, wird sofort in erhöhtem Maasse der Erosion zugänglich, wenn es zu einer Falte aufgestaut wird. Erstens steigern sich die Niveaudifferenzen, die nothwendige Voraussetzung jeder Erosion, zweitens wird das Gestein zerklüftet und bis in seine innersten Tiefen der erodierenden Kraft

1) Vgl. Hull, The Survey of Western Palestine. Dublin 1886.

Digitized by Google

zugänglich. Wenn vorher eine Schichtentafel jedes Eindringen des erodierenden Wassers erschwerte, so bilden jetzt eine grosse Anzahl von klaffenden Spalten ebenso viele Angriffspunkte und jeder hervortretende Schichtenkopf ist der Erosion zugänglich. Dadurch wird bei eintretenden tectonischen Bewegungen ohne Veränderung der Stärke der erodierenden Kraft doch eine stärkere Erosionsleistung erzielt, und grössere Massen von Sediment geliefert. Mag dieses Sediment als Gehängeschutt am Fusse des Gebirges liegen bleiben, mag es als Moräne oder Flussschotter im Thal transportiert und aufgehäuft werden, mag es endlich als Sand und Schlamm weit bis ins Meer getragen werden — jede Dislocation steigert die Masse des gelieferten Sedimentes, ohne dass eine Steigerung der sedimentbildenden Kräfte nothwendig sei.

Ich kann diesen, ungemein wichtigen Zusammenhang hier nicht weiter ausführen, aber ich bin überzeugt, dass auch er bei der Erklärung der Wüstenschotter eine Rolle zu spielen habe, und dass somit eine ganze Reihe von Factoren zusammenspielen bei der Bildung jener Geröllager, die in den Thälern der Wüste so auffallend sind und zu so kühnen Speculationen Veranlassung gegeben haben.

An dem Beispiele des Uâdi Feirân habe ich auf S. 74, an dem des Uâdi Mucheired auf S. 60 gezeigt, welche Veränderungen nachweisbar in der Bewässerung der Wüstenthäler eintreten; ich könnte noch manches analoge Beispiel bieten, doch würde ich dadurch diesen Abschnitt allzuweit ausdehnen. Es kam mir nur darauf an zu zeigen, dass kein zwingender Grund vorhanden ist: zur Erklärung der Wüstenphänomene Kräfte einzuführen, welche der gegenwärtigen Wüste fremd sind, und meiner Überzeugung Ausdruck zu geben, dass die Erscheinungen der Gegenwart auch hier die Probleme der Vergangenheit befriedigend zu lösen im Stande sind.

IV. Die Kieswüste.

Wir haben zu zeigen versucht, welche Veränderungen ein ungestörtes, welche ein dislocirtes Gebirgsland erleidet, wenn es sich unter dem Einfluss des Wüstenklimas befindet. Wir sahen, mit welchen Mitteln und auf welchem Wege die wüstenbildenden Kräfte das Felsenland

Digitized by Google

einzuebnen suchen und welche Reliefformen hierbei gebildet werden. Unsere weitere Aufgabe ist es, diesen Prozess bis zu Ende zu verfolgen, den Denudationsvorgängen nachzuspüren, die meteorologischen Kräfte bei ihrer Thätigkeit zu belauschen und zu verfolgen, wie aus einer felsigen Wüste eine Wüstenebene wird, je nachdem bedeckt mit Kieseln, mit Sand, oder mit salzigem Lehm. Um Wiederholungen zu vermeiden, werde ich unter den Überschriften: Kieswüste, Sandwüste, Lehmwüste jedesmal die bei der Bildung jedes Typus massgebendsten Vorgänge schildern, dabei aber darf nicht übersehen werden, dass die, aus didactischen Gründen, isoliert behandelten Erscheinungen in den mannigfaltigsten Combinationen miteinander vereint auftreten. Erst in dem Schlusscapitel können wir zusammenfassend ein abschliessendes Urtheil abgeben und die jetzt zu schildernden Vorgänge in ihrem Zusammenhang und ihrer Wechselwirkung betrachten.

Wie aus dem früheren Abschnitte hervorgeht, ist es das Ziel aller Denudation in der Wüste, die Oberfläche der letzteren einzuebnen und auf diese Weise eine horizontale Bodenfläche herzustellen. Ist dieses Ziel erreicht, dann verändert sich die Intensität und Wirkungsweise der Denudation, und wenn keine Felsklippen mehr abzurunden, keine Zeugen und Tafelberge mehr niederzureissen sind, dann wird die Denudation regional, sie versucht die gesammte Wüstenoberfläche anzugreifen, und Insolation, Wind und Sandgebläse sind die wichtigsten Factoren, deren Thätigkeit sich dann noch zu äussern vermag. Deshalb, weil diese drei Kräfte am leichtesten in der Kieswüste zu beobachten sind und am typischsten hier auftreten, will ich unter vorstehender Überschrift die Wirkungsart dieser Kräfte in ihrer gemeinsamen Thätigkeit zu schildern versuchen. Die Bildung der schwarzen Schutzrinde und das Problem der versteinerten Hölzer, welche ebenfalls in der Kieswüste häufig beobachtet werden können, sollen in besonderen Abschnitten angeschlossen werden.

Ein Grundgesetz aller Denudationsvorgänge auf der Erdoberfläche ist die Auslese alles dessen, was den specifischen klimatischen Factoren am längsten zu widerstehen vermag. Im wasserreichen Klima ist die chemische Zersetzungsfähigkeit eines Gesteines der massgebende Factor, der seine Erhaltungsfähigkeit bestimmt. Je

Digitized by Google

weniger die Oberfläche eines Gesteines oder Minerales chemisch angreifbar ist, desto länger ist seine Dauer.

In der Wüste wirkt die Denudation viel mehr physikalisch, und die Zähigkeit und Härte eines Gesteins gegenüber der Insolation ist das massgebende Princip für die grössere und geringere Verbreitung desselben. Nicht ohne Grund sind Quarzsand und Kieselgerölle das verbreitetste Gestein in der Wüste. Auslese des Härteren ist das bestimmende Princip, und in dem Kampf ums Dasein der Gesteine wird Alles von den Kieselgesteinen an Stärke und Dauer übertroffen. Es findet keineswegs in der Wüste eine oberflächliche Verkieselung der Gesteine statt, welche dieselben widerstandsfähiger macht gegen die Angriffe der Sonne und des Windes, sondern jene unzähligen Kieselgerölle, jene Massen von Quarzsand beweisen, dass von allen Mineralien, welche gesteinsbildend in der Wüste auftreten, nur diese beiden ausgelesen und erhalten bleiben, während alles Übrige zerstört und weithin entführt wird. Wenn wir die Oberfläche der Wüste mit verkieselten Austern oder mit harten Nummuliten bedeckt sehen, so müssen wir uns daran erinnern, dass vielleicht hundert Fuss Kalkstein entführt wurden, als deren Denudationsrelict die einst darin verstreut enthaltenen Versteinerungen jetzt vereint nebeneinander liegen.

Wir müssen stets im Auge behalten, dass die Kieswüste aus der Felswüste entsteht und dass bei den denudierenden Vorgängen, die ich im vorausgehenden Abschnitt zu schildern versuchte, als Endproduct eine flachgewellte Ebene entsteht, bedeckt mit denjenigen Resten der einst darüber aufgethürmten Gesteine, welche härter waren als ihre Umgebung. Die Erosion ist gering geworden, denn nicht mehr wird der herabstürzende Regen in enge Uâdischluchten gesammelt, um eine intensive Kraftwirkung ausüben zu können, der gelegentlich fallende Regen vertheilt sich auf wenig gegliederte Ebenen und wird von der Oberfläche derselben bald aufgesogen. Auch die chemische Verwitterung ist kaum merklich, denn nirgends findet sich auf der weiten Hamada eine schattige Stelle, wo jene zu wirken vermöchte. Infolgedessen ist auch der Pflanzenwuchs gering, und somit bleiben von den in der Einleitung charakterisierten Kräften nur Insolation, Deflation und Sandgebläse als denudierende Kräfte der Kieswüste übrig.

Digitized by Google

Das Verhältniss der Kieswüste zu ihrem Bildungsheerd stellt Schweinfurth in folgender Schilderung klar: »Das Sandkorn, das wir am Eingang eines Wüstenthales auflesen, hat im Laufe der Zeit den meilenweiten Weg vom Kamme des Gebirges bis zur Küste zurückgelegt, nicht so das Basaltstückchen, welches eine unvergleichlich geringere Ortsbewegung aufzuweisen hat. Die isoliert auftretenden Streifen basaltischen Gesteins entsprechen ebenso vielen niederen Höhenzügen, diese zusammen stellen ebenso viele Hügelreihen, Bergketten und schliesslich Gebirgsrücken dar. Je weiter man landeinwärts vordringt, nehmen diese Formationen in dem angedeuteten Sinne an Höhe zu«, und S. 377: »Auf den südlichen Pic der Soturba zugehend, überschritten wir mit grosser Mühe die von immer grösser werdenden Granit- und Gneissgeschieben bedeckte Thalfläche«[1]. Wir erkennen aus dieser Schilderung, dass die Vertheilung der Kiese in der Wüste eine sehr wechselnde ist, und dass man in günstigen Fällen leicht den Zusammenhang dieser Erscheinung mit dem ursprünglichen Bau einer denudierten Felswüste erkennen kann.

Was dem Reisenden dann besonders auffällt ist, dass gewisse Ebenen ganz mit scharfkantigen Steinen bedeckt sind, dass andere mit rundgeschliffenen, glänzend polierten Kieseln übersäet erscheinen. In beiden Fällen liegt meistentheils Quarzsand zwischen den Steinen vertheilt. Den letzteren Typus, den »Sserîr« wo die Kieswüste aus runden Geröllen besteht, zwischen denen geringe Mengen von Sand liegen, finden wir am besten in der libyschen Wüste vom Nilthal westlich entwickelt. Aber auch die Nordgehänge des Mokattam, gewisse Gebiete am Sinai und in der arabischen Wüste gehören hierher. Mit scharfeckigen, weniger gerundeten Steinen sind die Hochflächen der »Hamada« bedeckt, welche in allen Theilen Nordafrikas sich findet.

1. Das Sandgebläse.

Fast überall findet der Wüstenwind kleine Gesteinsfragmente, die er zu tragen vermag und die er als Wurfgeschosse gegen jeden Felsen schleudert, der sich ihm in den Weg stellt; deshalb gehören

1) G. Schweinfurth, Zeitschr. f. Allg. Erdkunde 1865, p. 135 u. 373.

Digitized by Google

die Spuren des Sandschliffes zu den charakteristischen Erscheinungen jeden Wüstengebietes. Welche Wirkung der mit Sand beladene Wind auszuüben vermag, das erkennen wir aus der grossen technischen Verwendung, welche neuerdings das Sandgebläse in der Glasfabrikation gefunden hat, und THOULET [1]) verdanken wir sorgfältige experimentelle Studien über die Wirkung des Flugsandes. Er erhielt folgende Resultate:

I. L'abrasion [2]) est directement proportionelle à la quantité de poudre produisant cette abrasion.

II. Une roche résiste mieux à l'abrasion quand elle est polie que lorsqu'elle est dépolie.

III. Jusqu'à une certaine limite l'abrasion augmente proportionnellement à la distance qui sépare la plaque usée de l'ouverture par laquelle arrive le jet de sable, mais après cette limite qui est atteinte d'autant plus rapidement que la pression est moindre, l'accroissement de l'abrasion devient nul et nécessairement, même ensuite négatif. Cette loi, sans application dans la nature, peut être utile à connaître dans l'industrie.

IV. Une poussière dont les grains ayant déjà produit une abrasion sur une roche sont arrondis, use désormais moins que lorsque ces grains n'ont pas encore servi et ont conservé l'irrégularité de leur surface.

V. L'action abrasante d'une poudre est d'autant plus puissante que les grains qui constituent celle-ci ont des dimensions plus considérables; cependant l'influence exercée par la dimension des grains est en elle même assez faible.

VI. Le calcaire pulvérulent ne produit aucune abrasion sur les roches quartzeuses; calcaire contre calcaire ou quartz contre quartz donnent lieu à la même abrasion; l'effet maximum est produit par une poussière de quartz choquant une roche calcaire.

VII. L'abrasion est directement proportionnelle à la pression du vent chassant la poudre abrasante.

---

1) THOULET, Expériences synthétiques sur l'abrasion des roches par le sable. Compt. Rend. Acad. Sc. T. CIV, p. 381. Annales des Mines Mars-Avril 1887.

2) Das Wort Abrasion bezeichnet nach deutschem Sprachgebrauch die Vorgänge der Meeresbrandung; ich habe es aber in dem Citat unverändert gelassen.

Digitized by Google

VIII. L'abrasion est d'autant plus énergique que la roche sur laquelle elle s'exerce est plus près d'être verticale par rapport à la direction du sable qui la frappe horizontalement et elle diminue très rapidement d'intensité aussitôt que l'inclinaison devient inférieure à 60 degrés.

IX. Pour tout corps solide, il est possible de représenter par un chiffre la valeur absolue de la résistance qu'il oppose à l'abrasion en prenant pour unité la résistance opposée dans les mêmes conditions par une plaque de quartz taillée perpendiculairement à l'axe.

X. Dans les cristaux, l'abrasion, comme toutes les autres propriétés physiques, suit les lois de la symétrie cristalline.

XI. A dureté égale, les roches homogènes ou hétérogènes à éléments très petits résistent mieux à l'abrasion que les roches constituées par des éléments plus gros et de nature plus différente.

XII. Une roche s'abrase plus quand elle est humide que lorsqu'elle est sèche et d'autant plus qu'elle est susceptible d'absorber par porosité une plus grande quantité d'eau.

Kein Gestein ist so gleichmässig gebildet, dass es nicht geringe Härteunterschiede in seinem Gefüge erkennen liesse. Diese ursprünglichen Härteunterschiede bedingen es, dass verschiedene Felstheile so ganz verschieden gestaltet werden.

Betrachten wir einzelne Typen solcher Härtedifferenzen: Ein Porphyr, welcher am Nordende des Arabahgebirges am Ras Djehän mächtige Gänge bildet, enthält porphyrische Feldspathkrystalle, welche weicher sind als die Grundmasse des Gesteins. Infolge dessen erhält das Gestein eine blatternarbige Oberfläche, da alle Feldspäthe vertieft erscheinen.

Die sedimentären Gesteine der ägyptischen Wüsten sind oft aus dünneren Bänken von verschiedener Festigkeit aufgebaut, welche mit einander wechsellagern; eine solche Felswand wird ungemein rasch zerstört, indem die weicheren Schichten herausgeblasen werden (Salzgehalt und Verwitterung helfen hierbei mit), so dass die härteren Bänke weit hervorragen, ihren Halt verlieren und abbrechen. Fig. 9 von Dj. Burbäh (Sinaiküste) zeigt die Erscheinung ganz vortrefflich.

Es kommt auch vor, dass ein Gestein auf den Querbruch ganz homogen erscheint, und dennoch aus verschieden harten übereinander

Digitized by Google

liegenden Schichten besteht, welche dem Sandgebläse verschieden kräftig wiederstehen und dadurch herausmodelliert werden. Taf. IV, Fig. 1 zeigt ein solches Kalkstück, das auf dem Querbruch nur geringe Andeutung eines schichtenförmigen Baues beobachten lässt, das jedoch diesen Bau vortrefflich erkennen lässt auf der durch Sandgebläse corrodierten Aussenseite, wo die härteren Schichten um 1/2 cm hervorragen, während weiche Zwischenschichten vertieft erscheinen.

Von ursprünglichen Härteunterschieden wären endlich die Versteinerungen zu nennen, welche oft härter als das umgebende Gestein durch das Sandgebläse herausmodelliert werden. Besonders dann, wenn die Versteinerungen etwas verkieselt sind, werden sie ungemein scharf herausgearbeitet. Das schönste Belegstück für die Wirkungsweise des Sandgebläses giebt Taf. IV, Fig. 2 wieder. Das nummulitenreiche röthliche Kalkstück lag in der dargestellten Lage, mit der Unterseite z. Th. im Sande vergraben und so gegen die herrschende Windrichtung orientiert, dass die rechte Seite dem Winde zugekehrt war. Der Sand wurde demzufolge gegen die rechte Seite des Stückes geblasen, und rollte auf der linken Seite herunter. Die im Kalk enthaltenen Nummuliten sind etwas härter als der dichte Kalk, der sie umhüllte. Daher leisteten sie dem Sandgebläse länger Widerstand, wurden ausgespart, und schützten sogar das hinter ihnen befindliche Kalkgestein vor den Sandprojectilen. Daher sitzen 2—8 mm grosse Nummuliten auf bis zu 3 cm hohen Stielen, gerade wie die Platte eines Gletschertisches auf seinem Eisfuss. Indem aber auf der Leeseite (links) die Sandkörner herabrieselten, schufen sie hier eine mäandrische Furchung der Gesteinsoberfläche, wie sie ungemein charakteristisch ist für viele Wüstensteine und welche das abgebildete Stück in ausgezeichneter Weise erkennen lässt. Bisweilen entstehen infolge verschiedener Härte einzelner Gesteinstheile vielfach durchlöcherte Stücke durch das Sandgebläse. Taf. IV, Fig. 4 stellt ein Stück fossilen Korallenkalkes dar, in dem die härteren Fossilien zwar nicht herausmodelliert wurden, aber doch länger dem Sandgebläse widerstanden und dessen Wirkung beeinflusst haben. Da die Versteinerungen oft härter als das umgebende Gestein sind, so darf es uns nicht Wunder nehmen, wenn wir in der Wüste ganze grosse Flächen mit Fossilien übersäet

Digitized by Google

finden. Ägypten ist keineswegs fossilreicher als irgend ein anderes Land der Erde, aber auf der Oberfläche der Wüste liegen versammelt alle die Fossilien, welche in weicheren Schichten von grosser Mächtigkeit enthalten, durch Deflation dieser Schichten freigelegt wurden. So lernen wir verstehen, warum wir bald kilometerweit nur Exogyra am Boden liegen sehen, bald ganze Lager von Ammoniten bemerken, bald meilenweit nur über Nummuliten reiten. Die Versteinerungen eines mächtigen Schichtencomplexes werden durch die Denudation in der Wüste auf eine Ebene projicirt, daher ihre Häufigkeit.

Die Erscheinung der sogenannten »versteinerten Wälder« in der

Fig. 52. Porphyrgänge in der südl. Sinaiwüste.

näheren und weiteren Umgebung von Cairo findet in dem besprochenen Vorgang ihre einfache Erklärung. Im fünften Absatz wird dieselbe ausführlich behandelt werden.

Aber auch secundäre Vorgänge erzeugen Härteunterschiede in Gesteinen. Hierher gehört zuerst die Bildung von Gängen. 10 Kilometer westlich von Giseh fand ich 6 mm dicke Quarzplatten, welche vertical aus dem Boden 10—20 cm hervorragten und polygonale Felder umgrenzten. Es waren Quarzgänge im Nummulitenkalk, welche härter als dieser, von der Denudation verschont geblieben waren und aus dem Boden hervorragten.

In grossartigem Massstabe aber beobachtet man diese Erscheinung in der südlichen Sinaihalbinsel, wo viele mächtige Eruptivgänge den Lagergranit durchsetzen und, härter als das Nebengestein, lange Hügelzüge bilden, welche dem Streichen dieser Gänge entsprechen, wie obenstehende Zeichnung s. Fig. 52 wiederzugeben versucht.

Endlich werden Härteunterschiede durch Concretionenbildung

Digitized by Google

gegeben, und abermals werden solche härtere Concretionen widerstandsfähiger als das Nebengestein. Der Nubische Sandstein enthält grosse Mengen von Eisen- und Mangansalzen, welche ihm oft eine rothe oder braune Farbe ertheilen. Diese Eisensalze finden sich nun oft als Concretionen ausgeschieden und geben hierdurch zu sonderbaren Erscheinungen Anlass.

Fig. 53. Verwitterungsformen des Nubischen Sandsteins im Uâdi Maghâra.

Im Uâdi Maghâra am Sinai, gegen das Uâdi Mokátteb zu, finden sich solche concretionäre Anhäufungen von Eisenoxydul, welche concentrische Ringe auf der Fläche der Sandsteinfelsen bilden. Diese verschieden gefärbten Ringe sind härter, wittern heraus, und geben dadurch den Sandsteinfelsen, wie beifolgende Skizze s. Fig. 53 wiedergiebt, eine sehr sonderbare Oberfläche.

Ganz ähnliche Ringe von Eisensalz finden sich auch in eocänen Kalken, und sie fallen besonders an dem Kalkstein in die Augen, aus dem der Sphinx gemeiselt ist s. Fig. 54. Hier erscheinen sie an der Brust und am Hals des Kolosses als diagonale Streifen, welche der durch discordante Parallelstructur entstehenden Gliederung so ähnlich sehen, dass O. Fraas[1]) und im Anschluss an ihn Neumayr[2]) diese Zeichnung für discordante Parallelstructur halten. Aber dieselbe hat mit letzterer gar nichts zu thun, denn sobald man die linke Seite des Sphinx betrachtet, erkennt man ohne Mühe, dass jene diagonalen Bänder nur die Durchschnitte grosser Farbringe sind, welche unbekümmert um die Schichtung des Echinolampas-Kalkes, mehrere Meter im Durchmesser, die Flanken des Colosses bedecken.

Ausser diesen, auf dem Querbruch als Ringe erscheinenden Concretionsgebilden, finden sich solche im Nubischen Sandstein von kleineren Dimensionen und von verschiedener Form in ungeheuerer Menge, und da sie härter als der Sandstein sind, so werden sie herausgeschält und bedecken weite Strecken in der Wüste. So lesen

1) Aus dem Orient, p. 118.

2) Erdgeschichte. Bd. I, p. 472.

Digitized by Google

Fig. 54. Der Sphinx bei Giseh.

Digitized by Google

wir bei Rohlfs[1]): »Südlich von Kauar geht der Weg über 100 Fuss hohe steile Sandketten. Wie immer verlaufen sie meist von W nach O, manchmal mehr nach N, manchmal mehr nach S abweichend. Neben Ammonitenabdrücken finden sich unzählige schwärzliche und glasige Steine, von der Grösse einer Erbse bis zu der einer Faust, die inwendig hohl, manchmal einen feinen weissen Sand einschliessen, meist jedoch ganz leer sind. Eine Öffnung ist nirgends an ihnen wahrzunehmen.«

Ich habe dieselben Mangankugeln im Arabahgebirge weitverbreitet gefunden, von allen Grössen und Formen. Häufig waren sie nur zum Theil aus dem Sandstein herausmodelliert und zeigten auf der einen (Lee-)Seite noch einen Höcker von Sandstein, den sie vor dem Wegblasen geschützt hatten. Bald waren es Hohlkugeln, bald

Fig. 55. Manganconcretionen aus Nubischem Sandstein ausgewittert im Arabahgebirge (Sinaihalbinsel).

zwei Kugeln ineinander; oft von ganz runder, oft von ganz gestreckter Form. Eine Anzahl ragten als Röhren einen Fuss über den Boden heraus, andere Röhren verzweigten sich im Sandsteinfelsen (siehe Fig. 55). Derartige durch Deflation isolierte violett gefärbte Manganconcretionen sind auf Taf. V abgebildet. Fig. 4 ist eine fast runde Kugel, die nur an einer Stelle eine Öffnung besitzt und vollkommen hohl ist. Fig. 6 und 7 zeigen Fragmente langestreckter Concretionen, deren Wand aus mehreren Schalen besteht, zwischen denen noch einzelne gröbere Sandkörner sitzen geblieben sind, während Fig. 5 eine bis auf wenige Löcher geschlossene hohle Kapsel ist.

1) Petermann, Erg.-Hefte XXV, p. 40.

Digitized by Google

Ebenso werden die Feuersteinconcretionen aus den Kreidekalken herausmodelliert und bedecken ganze Flächen in der Wüste. »Höchst auffällig[1]), so berichtet die Expedition des Erbgrossherzogs von Oldenburg, und unerklärt war die Erscheinung, dass zwei Tagereisen westlich von Schag rechts und links vom Weg häufig Steinfelder sich ausbreiteten, in denen Kalkstein und Silexdrusen von vollkommen regelmässiger Kugelform und in einem Durchmesser von etwa 2 Fuss ganz genau aufgerichtet und in vollkommen gleichen Abständen wie die Bäume einer sorgfältigen Waldcultur lagen.« So liegen Feuersteinbrode von 2—3 Fuss Durchmesser nach den Schilderungen von Schweinfurth westlich vom Dj. Set, und Ingenieur Michel hat Proben davon im Museum der Medicinischen Schule zu Cairo niedergelegt.

Kein Gestein ist der Deflation gegenüber so widerstandsfähig als Feuerstein, Kieselkalk, Jaspis und ähnliche Kieselsäuregesteine. Sie finden sich als Versteinerungsmittel, als Concretionen und als Cäment ganzer Schichtenbänke oft in den Sedimenten Ägyptens. Indem nun alles andere Gestein durch die Wüstendenudation zerstört und durch Deflation entfernt wird, bleiben diese Stücke allein übrig, und bilden jene ungeheueren Kiesflächen, die als Sserīr in der libyschen Wüste so weit verbreitet sind.

Der Sserīr ist also nichts weiter als eine durch Deflation eingeebnete Felsmasse, deren einstiger vielvertheilter Gehalt an Kieselgesteinen gesammelt übrig blieb, während alle weicheren Felstheile zerstört und entführt wurden. Wie nach dem Tod eines Wirbelthieres die Weichtheile verfaulen und entfernt werden, während die darin vertheilten Knochen zusammensinken und als Knochenhaufen übrig bleiben, so waren die Kiesel des Sserīr in einer grösseren weichen Felsmasse vertheilt und liegen jetzt gehäuft bei einander, während das sie früher trennende weichere Gestein in alle Winde zerstreut wurde.

In welcher Weise diese »Wüstenkiesel« (fälschlich »Nilkiesel« genannt, da der Nil nur Schlamm führt) zerkleinert werden, das haben wir im nächsten Abschnitt zu betrachten. Zuerst mag ihre

1) Petermanns Mitth. Bd. XXI, p. 213.

Digitized by Google

auffallendste Eigenschaft, die Politur und ihre Abrundung besprochen werden.

Der flüchtige Beobachter wird nur runde Kiesel (Taf. V, Fig. 2 stellt eine fast völlig runde Kieselkugel dar, wie sie gelegentlich als Product allseitig wirkenden Sandgebläses entsteht) auf einer Sserirfläche beobachten, und da er gewohnt ist runde Kiesel als Flussgeschiebe oder Brandungsgerölle zu sehen, so wird er auch die Rundung der Wüstenkiesel als ein Product fliessenden Wassers ansehen. Obwohl diese Ansicht in manchem vortrefflichen Wüstenwerk ausgesprochen wird, so bedarf sie für den Kenner der Wüste keiner Widerlegung. Denn eine Wasserfluth, welche die Sserīrflächen der libyschen Wüste gleichmässig überspült haben sollte, müsste selbst die kühnste Phantasie übertreffen.

Wo in der Wüste Wasser fliesst, oder geflossen ist, da findet man Gerölle, zwar von runder Gestalt, aber ohne jenen charakteristischen Glanz, oder Firniss s. Taf. V, Fig. 8, der die Sserirgerölle auszeichnet. Zudem sehen wir, dass keineswegs alle Sserīrkiesel gerundet sind, dass wie ich unten schildern werde, viele durch Sprünge getheilt sind, und dass an den neuentstandenen Kanten sich neue Rundungsspuren erkennen lassen. »Die grösseren Quarzstücke, welche in vielen Wüstenthälern Kiesel darstellen, bezeugen durch ihre flachen und nicht allseitig abgerundeten Formen eine schleifende Wirkung des vom Winde bewegten Sandes. Während die Kiesel in Flussbetten und die an der Meeresküste durch häufiges Rollen sich nach bestimmten Gesetzen gleichmässig abschleifen, bedingt bei dem äusserst langsam bewegten Wüstenkiesel bloss Lage und vorherrschende Windrichtung seine gleichsam zufällige Gestalt.« Diese Worte SCHWEINFURTH's[1]) treffen die Thatsache am besten. Ich habe früher einmal Gerölle durch Lichtdruck dargestellt[2]), welche erst vom Wasser gerollt, dann durch den Sand zur Hälfte angeschliffen, beide Schliffarten nebeneinander geben, und dort gezeigt, wie grundverschieden beide sind. Der Sandschliff ist fast immer wie gefirnisst, während der Wasserschliff nur im befeuchteten Zustand glänzend erscheint. (Zum

1) Zeitschr. f. Allg. Erdkunde. Berlin 1865, p. 135.

2) Berichte der math.-physik. Classe der Königl. S. Ges. d. Wissensch. Leipzig 1887, 14. November.

Digitized by Google

Vergleich habe ich, der Curiosität halber, auf Taf. I, Fig. 8 ein Stück eocänen Kalkes dargestellt von einem Saumpfad, der aus dem Uâdi Ashar auf das Plateau der südlichen Galâla hinaufführt. Da dieses der einzige Zugang für die auf dem Plateau gelegenen vegetationsreichen Weideflächen ist, wurden seit undenklichen Zeiten alljährlich viele Kamele auf diesem Saumpfad hinaufgeleitet, deren weiche Sohlen allmählig den harten Kalkfelsen so gerundet haben, dass er in der Sonne spiegelt und als »pseudoglacialer Schliff« betrachtet werden kann.)

Indem tausende solcher vom Sand rund geschliffener Kiesel im Sserīr nebeneinander liegen und den Boden bedecken, erhält die ganze Sserīrlandschaft einen eigenthümlichen Glanz, sie sieht aus als ob der Wüstenboden mit Firniss oder mit Fett überstrichen wäre, und die bläulichen Lichter auf den dunkelbraunen Kiesflächen geben ungemein malerische Farbeneffecte (vgl. Fig. 73, 74).

Der feine Flugsand, der die Kiesel gerundet hat und alle (s. u.) frisch entstehenden Kanten aufs Neue rundet, liegt überall zwischen den Kieseln, und wer Gelegenheit gehabt hat bei starkem Wind über eine Sserīrfläche zu reisen, der hat sich leicht überzeugen können von der schleifenden Thätigkeit dieses Sandes. Dann ist der ganze Boden lebendig, überall kriecht der Sand mit schlangenartigen Windungen über die Kiesflächen, so dass das Auge, rasch ermüdet von der schlängelnden Bewegung der Sandstreifen, nicht lange das Schauspiel zu betrachten vermag. Wie Wasser in einem seichten Flussbett, so winden sich die kleinen Sandgerinne zwischen den Kieseln hindurch, bald vereinigen sich zwei Ströme, bald gabeln sie sich, wenn Widerstände ihnen entgegen treten. Und auf diesen letzteren Vorgang muss eine Erscheinung zurückgeführt werden, welche grösseres Aufsehen erregt hat, als sie verdiente, das so viel discutierte Problem der »Dreikanter«-Bildung.

Es war meines Wissens am 5. April 1876, dass G. Berendt zum erstenmal die Aufmerksamkeit der norddeutschen Geologen auf eigenthümliche Facetten aufmerksam machte, welche an Geröllen im Diluvium bemerkbar sind. Seit dieser Zeit haben diese sogenannten »Dreikanter« oder Kantengerölle die Geologen interessiert und eine grosse Literatur ist über diese Erscheinung geschrieben worden. Man hielt sie für eine Wirkung des Eises, grossen Druckes etc., bis

Digitized by Google

Mickwitz in seiner Abhandlung die richtige Lösung der Frage gab, indem er nachwies, dass diese Facetten nur eine Sandschlifferscheinung seien, eine Ansicht, die inzwischen von Credner, Heim, Sauer u. A. nur bestätigt worden ist. Nur über die Art, wie diese Flächen angeschliffen werden, gehen die Ansichten noch auseinander. Ich habe eine Anzahl solcher Kantengerölle[1]) in verschiedenen Theilen der Wüste gesammelt; zuerst fand ich sie im Uâdi Arabah in der arabischen Wüste, dann zwischen Gîseh und Abu Roâsch am Rande der libyschen Wüste, und Dr. Dr. Sarasin haben sie auf der Sinaihalbinsel gefunden.

Nach diesen meinen Erfahrungen sind es Kalke der Kreideformation von feinem, dichtem, sehr gleichmässigem Korn, welche in Ägypten »Dreikanter« bilden; andere Gesteine habe ich nicht in dieser Form gefunden. Die eocänen Kalke mögen zu weich, die Nummulitengesteine zu ungleichmässig hart sein, und die krystallinischen Gesteine werden, wie ich im Folgenden zu schildern habe, in der Wüste so rasch zersetzt, dass sie sich für »Dreikanter«-Bildung nicht eignen.

Die Zahl der angeschliffenen Kanten wechselt ebenso sehr wie die Grösse der Gerölle, und beides steht in keinem ursächlichen Verhältniss. Ich fand fussgrosse Einkanter und nussgrosse Fünfkanter und umgekehrt.

Die Kanten sind von verschiedener Schärfe und ich glaube beobachtet zu haben, dass die Kanten nur dadurch entstehen, dass zwei angeschliffene Flächen sich schneiden, so dass der Ausdruck Facettengerölle mir richtiger zu sein scheint als Kantengerölle.

Auf Taf. IV, Fig. 5 ist ein grosser »Dreikanter« dargestellt, während Taf. IV, Fig. 3 sodann Taf. V, Fig. 1. 3. 9 kleinere Dreikanter zeigen. Besonderes Gewicht möchte ich jedoch auf das Taf. IV, Fig. 6 dargestellte Stück legen, das zwar Facetten, aber keine Kanten besitzt und welches zeigt, dass die Facette das Ursprüngliche, die Kante das Secundäre ist, entstanden durch zwei sich schneidende Facetten.

Einen Zusammenhang zwischen der Richtung der Kanten und

---

1) Berichte der math.-physik. Classe der Königl. S. Ges. d. Wissensch. Leipzig, Nov. 1887.

Digitized by Google

der Windrichtung konnte nicht finden, und Solches scheint mir auch leicht begreiflich, da ich constante Winde nicht beobachtet habe, und da die Richtung des Windes in der Wüste oft jede Stunde wechselt.

Dagegen habe ich Facettengerölle nie isoliert gefunden, sondern stets verstreut zwischen ziemlich nahe bei einander liegenden Wüstenkieseln. Beistehende Zeichnungen Fig. 56 u. 57 geben die Lage von Facettengeröllen unter anderen Steinen wieder. Ich habe bei Sandwind die Bewegung des Sandes zwischen solchen Kieseln öfters beobachtet und hierbei folgende Anschauung über die Bildung der Facetten gewonnen:

Der Sand fliesst in kleinen Strömen über den Boden hin und die auf dem Boden liegenden Kiesel bilden ebenso viele Hindernisse und Widerstände für die kleinen Sandgerinne. Vor einem grösseren

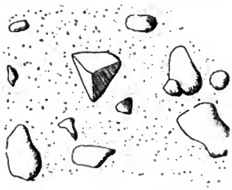


Fig. 56. Situation eines Dreikanters und eines Einkanters bei el Gaâ.

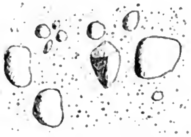


Fig. 57. Situation eines Vierkanters bei el Gaâ.

Kiesel theilt sich der Sandstrom, um sich oft hinter dem Hinderniss wieder zu vereinigen, oft laufen die getheilten Stromäste eine Strecke isoliert weiter, um dann wieder mit anderen benachbarten zusammen zu laufen. Infolge dieser Gabelung und Wiedervereinigung kleiner Sandströme, hervorgerufen durch die am Boden liegenden Steine, werden solche Steine, auf welche convergierend zwei Sandströme stossen, mit zwei Facetten versehen, deren jede durch einen Sandstrom gebildet wurde. Indem sich diese Facetten immer mehr vergrössern, kommen sie endlich zum gegenseitigen Schneiden und bilden dadurch eine Kante. Gerölle, welche constant durch ähnliche Sandströme bespült werden, erhalten scharfe Kanten, wechselt aber die Richtung der Sandströme, so werden die Kanten und Flächen undeutlich und wieder verwischt.

Digitized by Google

Mit anderen Worten: es werden an die Gerölle Flächen angeschliffen, deren Vergrösserung Kanten bildet; und deshalb scheint mir das Wort Facettengerölle den Vorgang ihrer Bildung am besten zum Ausdruck zu bringen, denn die Kante ist secundär.

2. Die Insolation.

Gleichzeitig mit der Abrundung der Wüstenkiesel durch den Sandwind vollzieht sich in den Gebieten der Kieswüste ein zweiter Vorgang, der jenem entgegenarbeitet und seine Wirkung aufzuheben sucht. Infolge der starken Erwärmung der Steine bilden sich Sprünge in denselben, welche immer tiefer dringend, endlich den Stein zersprengen und in scharfkantige Stücke theilen. Es ist leicht verständlich, dass die Abrundung durch den Sand einerseits und das Zerspringen durch die Sonne andererseits, ein Gestein mehr beeinflusst, als das andere. Feuersteine werden leicht rund geschliffen, zerspringen in eigenthümlich kreisrunde Scheiben und behalten nicht lange ihre scharfen Kanten; Sandstein und Kalk wird leicht zersprengt, aber der Sand kann nur die entstehenden Kanten runden, nicht den Stein rund schleifen.

Infolge des verschiedenen Widerstandes, den bestimmte Gesteine je nachdem der Insolation oder dem Sandgebläse entgegensetzen, entstehen in der Kieswüste jene verschiedenen Typen in der Form und Bildung der den Boden bedeckenden Steine. Bei dem Sserir überwiegt die Abrundung durch den Sand, bei der Hamada überwiegt die Bildung scharfkantiger Sprengstücke. »Die abwetzende Wirkung[1]) von den Winden angespülten Sandes scheint zwischen Kossēr und Suakin ohne Einfluss zu sein oder wenigstens langsamer zur Geltung zu kommen, wie sich neue Risse bilden. Und die stets scharfkantigen Gestalten selbst der kleinsten Gesteinstrümmer von Basalt beweist, wie gering auch die Wirkung zufälliger Regengüsse ist.« »Durch[2]) abwechselnde Hitze und Kälte werden die schwarzberindeten Sandsteine zerkleinert in scharfkantige Stücke, welche die Hamada von Tripolis bedecken.«

1) G. SCHWEINFURTH. Zeitsch. f. Allg. Erdkunde. Berlin 1865, p. 135.
2) VON BARY, Zeitschr. d. Vereins f. Erdkunde zu Berlin 1876, p. 164.

Digitized by Google

Im Uâdi Ssannūr[1]) fand Dr. Schweinfurth in grosser Menge jene Art Kieselsplitter, wie sie zwar von Menschenhand häufig benutzt, doch nie verfertigt sein können. Auch die dazu gehörigen Kerne, von welchen sich durch Temperaturverzerrung die prismatisch-stengeligen, planconvexen Stücke abtrennten, fanden sich daselbst in entsprechender Anzahl vor. Die erstaunliche Menge, in welcher derartige Splitter stellenweise weite Strecken in den ödesten Theilen der Libyschen und Arabischen Wüste bedecken, schliesst allein schon die Möglichkeit der Annahme von Artefacten aus (im Uâdi Ssannūr finden sich aber auch wirkliche Feuersteinbrüche, und rings herum ist Alles mit künstlich behauenem Flint bedeckt).

Aber auch aus anderen Theilen der Erde wird uns dasselbe Phänomen berichtet. So erzählt Livingstone[2]): »Am Abend nach einem heissen Tag war es sehr gewöhnlich, diese Basaltmassen zersplittern und unter einander fallen zu hören mit dem eigenthümlich klingenden Ton, der das Volk glauben macht, das Gestein enthalte viel Eisen. Mehrere grosse Massen, welche so durch Einwirkung der Kälte auf die von der Hitze des Tages ausgedehnten Theile zersprungen waren, sind die Abhänge der Hügel hinabgeglitten und, sich gegeneinander lehnend, haben sie Höhlen gebildet.«

»Die Gesteinsmasse der kahlen Felsengebirge von Persien, welche tagsüber einer bedeutenden Sonnengluth ohne jeden vegetativen Schutz ausgesetzt sind, und die des Nachts wiederum dem Einfluss kühlerer Temperaturen unterworfen werden, bekommen infolge der wechselnden Ausdehnung und Contraction Risse, Sprünge und Klüfte, es lösen sich grössere und kleinere Gesteinsbrocken von den hervortretenden Schichtenköpfen oder Gesteinsplatten ab, kurz es bildet sich hier wie anderwärts Gebirgsschutt, der sich in einer steten Bewegung abwärts befindet, welcher die wenig zahlreichen Regenniederschläge oder Schneeschmelze zu Hilfe kommen.[3])«

Wir lesen[4]), dass in Brasilien Steine durch die Sonnenhitze

1) Güssfeld u. Schweinfurth, Petermanns Mitth. XXII, p. 262.

2) E. Behm, Südafrica im Jahre 1858. Petermanns Mitth. 1858, p. 177.

3) Tietze, Zeitschr. des Ver. f. Erdkunde. Wien 1886, p. 517.

4) Ausland 1867, p. 1221.

Digitized by Google

zersprengt werden, und dass »in der Atacama[1]) nur wenig sandige Stellen sind. Der Boden ist mit seltenen Ausnahmen steinig und kiesig, und zwar sind die Steine so scharfkantig, dass die Guanacojäger genöthigt sind, ihren Hunden Schuhe anzuziehen, weil sie sich sonst schnell die Füsse wund laufen. Sehr häufig sind Chalcedon und Jaspis auf der Oberfläche.«

Ebenso schildern VATONNE und DUVEYRIER das Zerspringen der Steine in der westlichen Sahara.

O. FRAAS[2]) erzählt: »Es war in der Frühe kurz nach Sonnenaufgang, als die Sonne anfing ihren Einfluss auf den Boden geltend zu machen, dass ich an einem hart vor meinen Füssen liegenden Feuerstein eine halbzöllige kreisrunde Schale ausspringen sah und einen entsprechenden Ton dabei hörte.« So interessant und werthvoll diese Beobachtung ist, so gehört sie doch sicherlich zu den Seltenheiten, denn weder hat SCHWEINFURTH auf seinen vielen Wüstenreisen etwas Ähnliches gesehen, noch ist es mir gelungen, bei 70 Tagen Aufenthalt in der Wüste und 40 ohne Zelt campierten Nächten, dieses plötzliche Zerspringen zu beobachten. In der Regel scheinen die Sprünge sich langsam und allmählich zu bilden, denn bei aufmerksamem Suchen findet man nicht selten »halbgesprungene« Gerölle. Von den von mir gesammelten Stücken sind allerdings mehrere später durch eine leise Erschütterung ganz durchgebrochen, einige aber (Quarz, Porphyr, Feuerstein) bewahre ich jetzt noch mit unvollendetem Sprung in meiner Sammlung und habe die besten photographisch dargestellt. Wie ich früher schon erwähnt habe, lassen sich zwei Sprungarten unterscheiden: peripherische und radiale; beide können auch zusammen combiniert auftreten.

Auf Taf. I, Fig. 1. 2. 3 sind halbgesprungene Wüstenkiesel dargestellt. Fig. 1 ist ein Stück gelblichen Quarzes; der gerade Sprung geht etwa bis zur Mitte desselben, Fig. 2 ein Kalkgerölle, zeigte einen mehrfach gebogenen Sprung, längs dessen das Stück später ganz zerfallen ist; Fig. 3 ist ein Porphyrgeröll; der Sprung geht bis zur Mitte und setzt sich aus zwei Sprüngen zusammen, deren übereinandergreifende Enden auf der abgebildeten Fläche leicht zu erkennen sind.

---

1) Dr. PHILIPPI, Petermanns Mitth. II, p. 63.

2) Aus dem Orient, p. 38.

Digitized by Google

Wenn halbzersprungene Kiesel zu den Seltenheiten gehören, so sind dafür solche Stücke ziemlich häufig, bei denen ein durchgehender Sprung zwei oder mehr scharfkantige Stücke gebildet hat, die neben einander liegen und oft noch ganz vollkommen an einander passen. Auf Taf. II, Fig. 8 ist ein Kieselstück dargestellt, welches durch einen meridionalen Sprung getheilt ist, Fig. 7 zeigt ebenfalls die beiden Hälften eines Wüstenkiesels und Fig. 6 bringt einen solchen zur Darstellung, welcher in drei verschiedene Stücke zerlegt wurde.

Feuerstein und ähnliche Kieselgesteine werden durch Insolation in der Weise deformiert, dass kreisrunde Scheiben von verschiedener Grösse aus denselben herausspringen. Taf. II, Fig. 2 ist eine ziemlich grosse derartige Scheibe, ihrerseits mit den Sprungnarben kleinerer Sprünge bedeckt; auch Taf. II, Fig. 1. 3. 4. 5 zeigen solche kreisförmige Sprünge.

Das auf Taf. V, Fig. 8 dargestellte Stück zeigt ähnliche runde Sprünge, nur sind dieselben gegenseitig zum Schneiden gekommen, wobei der runde Umriss weniger deutlich erkennbar wird. Zugleich ist an diesem Bild und Taf. VIII, Fig, 2 der eigenthümliche Firniss oder Speckglanz der Kiesel in der Kieswüste recht gut zu sehen.

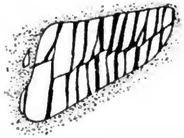


Fig. 58. Zersprungener Porphyrblock im Sande der Gaåwüste.

Von der Wichtigkeit dieses Vorgangs kann man sich eine Vorstellung machen, wenn man metergrosse Porphyrblöcke s. Fig. 58 im Sand der Gaåwüste liegen sieht, welche ganz von Sprüngen durchsetzt sind, so dass der Umriss des Blockes nur durch den umgebenden Sand zusammengehalten wird, und die Einzelstücke sofort auseinander fallen, wenn der Sand seine Lage verändert. Ganze Porphyrgänge zerfallen zu scharfkantigen Steinhaufen wie

Digitized by Google

beistehendes Vollbild Fig. 59 aus dem Uâdi Feirân erkennen lässt.

Bei Kalksteinblöcken sieht man häufig unvollkommene Sprünge, wie Fig. 60 zeigt.

Fig. 59. Durch Insolation zerstörter Porphyrgang im Granit des Uâdi Feirân.

Ist das so zerkleinerte, scharfkantige Gestein geeignet, durch Sandgebläse gerundet zu werden, dann bleiben die scharfen Kanten nicht lange, und das Wechselspiel beider Vorgänge erzeugt eine

Digitized by Google

grosse Mannigfaltigkeit der Erscheinungen. Wir lesen darüber bei Stapff:

»Die[1]) Gerölle der Kieswüste bei Walfischbay sind nicht durch Wasser abgerollt. Auffällig erscheint die glasurähnliche Politur vieler Gerölle, offenbar eine Wirkung des vom Wind auf sie geblasenen Sandes, welchem wohl der Schutt überhaupt seine Abrundung verdankt. Die Gerölle selbst verändern ihre Lage nur wenig, wurden aber vom windgepeitschten Sand umspielt, poliert, zu sehr verschiedenem Grade abgerundet, viele sogar angefressen.«

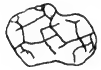


Fig. 60. Zersprungener Kalkblock im Uâdi Ashar.

Da sich der Sand fast überall in der Wüste findet, und viele Gesteine leicht gerundet werden, so darf man sich nicht wundern, wenn man mehr gerundete als scharfkantige Gerölle im Sserīr findet. Will man das andere Extrem studieren, so gehe man in eine Hammada, wo der Mangel des schleifenden Sandes, oder die Sprödigkeit des Gesteins mehr scharfe Kanten als gerundete Flächen erzeugt. Beides sind Kieswüsten, beide entstanden unter denselben klimatischen Bedingungen, aber die Verschiedenheit der Gesteine, die den wüstenbildenden Kräften unterworfen wurden, erzeugte jenen scheinbar so verschiedenen landschaftlichen Charakter.

3. Die braune Schutzrinde.

Ebenso charakteristisch wie die Spur des Sandgebläses ist jene braune oberflächliche Färbung, welche viele Steine und Felsen in der Wüste zeigen. Die hellbraune, dunkelbraune bis schwarze Farbe findet sich auf Kalk ebenso wie auf Kieselgesteinen, sie bildet sich in einer relativ kurzen Zeit, und muss als eine echte Wüstenerscheinung betrachtet werden. Die braune Rinde ist keine Verwitterungserscheinung, denn die mit ihr bedeckten Felsen sind härter und widerstandsfähiger als benachbarte Felsen ohne Rinde, deshalb wähle ich den Namen »Schutzrinde« für dieselbe.

Ich will gleich vorausschicken, dass ich mir ein sicheres Urtheil

1) Stapff, Verhandlungen d. Ver. f. Erdkunde. Berlin 1887, p. 48.

über den Bildungsvorgang nicht haben bilden können, ich habe möglichst viele Thatsachen gesammelt, und hoffe dadurch Denjenigen vorgearbeitet haben, die glücklicher als ich, das Problem zu lösen vermögen.

Es scheint mir, dass man gewisse schwarze Rinden, die sich an den Ufern tropischer Flüsse bilden, nicht mit den hier zu besprechenden Rinden der Wüste vereinigen darf, jedenfalls lässt sich beweisen, dass letztere gänzlich ohne Mitwirkung von Tropenklima und fliessendem Wasser entstehen. Über diese tropischen Rinden lesen wir bei Russegger[1]: »Die Aussenseite der Granitfelsen an den Katarakten von Assuan hat einen ganz dünnen, dunkelschwarzen, stark glänzenden Überzug, der ihnen das Ansehen giebt, als wenn sie gepecht wären. Dieser Überzug ist so dünn und mit der Masse des Gesteins so verflossen, dass er davon nicht getrennt werden kann. Besonders deutlich ist der Überzug an den Felsen nahe dem Wasser.«

Pechuel-Lösche[2]) schreibt: »An den vom Hochwasser berührten Stellen ist das Ufergestein des Kuilu ganz blauschwarz geworden, ebenso an der Wand von Bumina und an den Pallisaden.«

Wissmann[3]) schildert dieselbe Erscheinung: »Der Quige fliesst in einem nur wenig eingeschnittenen Sandsteinbett nach Westen dem Quanza zu. Gewaltige, mit schwarzer Verwitterungskruste bedeckte harte Sandsteinblöcke erschienen einem früheren Reisenden als Basalt.«

Ähnliche Verhältnisse schildert Humboldt von Südamerika[4]).

(Eine ganz ähnliche Rinde beobachtete ich auf Gneissfelsen in dem Dschungel verschiedener Theile von Ceylon. Die aus regeneriertem Urwald, oder aus Theeplantagen aufragenden Felsen waren überall mit einer intensiv schwarzen Rinde bedeckt, welche als ganz dünner Überzug der Oberfläche anhaftete. So auffallend war mir diese Schwärzung, dass ich begann Handstücke zu sammeln, als sich endlich das Räthsel in ungeahnter Weise löste. Es ergab sich nämlich, dass diese schwarzen Rinden aus Kohlenruss bestanden, der beim

---

1) Russegger, Reisen, Bd. II, p. 321.
2) Das Kuilugebiet, Petermanns Mitth. XXIII, p. 12.
3) Unter deutscher Flagge quer durch Africa. 1889, p. 15.
4) A. von Humboldt, Reisen. IV, p. 217.

Digitized by Google

Abbrennen des Urwaldes behufs Anlegung von Plantagen sich auf den Felsen niedergeschlagen hatte.)

Die hier zu behandelnden »braunen Schutzrinden« haben sich überall in der Wüste gebildet, und bilden sich noch gegenwärtig an Orten, welche nie von fliessendem Wasser bespült worden sind. Die Felsquadern auf dem Gipfel der Cheopspyramide zeigen die beginnende Bräunung ebenso wie die Blöcke in den weiten Hallen der Steinbrüche von Turra, aus deren Material die Pyramiden von Giseh erbaut wurden. Und zwar findet man die braune Rinde auf Flächen, welche noch heute die Spuren der altägyptischen Meisselhiebe tragen; in beiden Fällen ist eine Mitwirkung von Wasser ausgeschlossen. Taf. VI, Fig. 1 ist ein Stück eines Quaders aus den altägyptischen Steinbrüchen von Turra, welche das Material für den Pyramidenbau lieferten. Auf dem Querbruch ist die weisse Farbe des Kalkes, auf der Oberfläche sind die Meisselspuren der alten Ägypter zu sehen. Diese Oberfläche jedoch ist seit jener Zeit mit einer deutlichen braunen Rinde überzogen. Fig. 8 derselben Tafel stammt aus einer der Quadern auf der Spitze der Cheopspyramide, und lässt oberflächlich dieselbe Bräunung eines, auf dem Bruch vollkommen weissen Gesteins erkennen.

Wenn also beide Erscheinungen in ihrer Wirkung gleichmässig sind, so haben sie doch grundverschiedene Ursachen und dürfen nicht miteinander verwechselt werden.

Lernen wir zuerst die Verbreituug der Schutzrinden kennen. Russegger's[1]) Beschreibung ist nicht sehr deutlich gehalten: »Wie in ganz Nubien, so ist auch im Lande der Scheikie der Sandstein häufig bedeckt von einer vollkommen zu einem Schlackenglase geschmolzenen Schicht des Eisensandsteins, der sehr schwer verwittert und dessen schwarze Trümmer alle Gehänge bedecken.« Besser schildert Overweg die Erscheinung: »Zwischen[2]) dem Wadi el Hessi und dem W. Schiati (südlich der tripolitanischen Hammada) ist eine Region pechschwarzer Felsen. Das Gestein ist ein Sandstein, theils durchdrungen von Eisenerz und dann ganz schwarz oder braun, theils schneeweiss und nur an der der Luft ausgesetzten Oberfläche mit

1) Russegger, Neues Jahrbuch f. Min. 1838, p. 630

2) Overweg, Zeitschr. d. deutsch. geol. Gesellsch. 1851, p. 101.

Digitized by Google

einer dünnen glänzenden Kruste versehen. Der ganze Charakter dieser Gegend stimmt vortrefflich mit dem, was HORNEMANN vom Harudsch el Aswad und LYON, OUDNEY, DENHAM von den Sudah-Bergen angeben. Auch in Sokna finden sich dieselben weissen, äusserlich geschwärzten Sandsteine, die häufig nur auf der Oberseite schwarz, aber auf der Unterseite weiss sind.

»Die schwarzen Berge bei Sokna[1]) bestehen aus gelbem Sandstein mit Eisen schwarz gefärbt, sie schillern im Sonnenschein stark ins Bläuliche und es finden sich bisweilen mitten im Schwarz grosse kreisrunde Flecken von Gelb und Braun. — Die Gegend des Tibbulandes ist fürchterlich. Auf 600 Meilen nicht die geringste Spur von Vegetation, Alles Sand und schwarze Sandsteinfelsen. — Schwarz sind alle Felsen in der Sahara und im Tibbulande, aber nicht vulkanischen Ursprunges, Alles ist mit Eisen gefärbter Sandstein.«

Auf[2]) dem Plateau des Azgar (nördlich von Ghât) ist die ganze Landschaft dunkelgefärbt durch den von der Sonne geschwärzten Sandstein.

Im Süden[3]) der tripolitanischen Hammada sind röthlichgelbe Sandsteine häufig, welche von einer zolldicken (?) Kruste von Brauneisenstein schalenförmig umhüllt sind. Diese Rinde ist härter als das Gestein darunter und löst sich stets in ihrer ganzen Dicke ab, das gelbe Gestein nun blosslegend. Theile dieser schwarzen Schale haften dem Felsen oft noch an, und lassen so die frühere Oberfläche desselben erkennen.

Das Gebirge[4]) Tümmo besteht aus an der Oberfläche geschwärztem Sandstein, wie die schwarzen Berge des Had und Sokna.

Die Ebenen[5]) Arabiens sind mit schwarzem Geröll übersäet, die im Norden Harra, in Südarabien Feisch (pl. Fujûsch) genannt werden.

Aus der californischen Wüste berichtet WHEELER[6]): »Merkwürdig ist, dass oft auf weite Strecken hin Felsen und Geröll an der Oberseite schwarz gefärbt sind, gerade wie mit einem schwarzen Firniss

1) E. VOGEL, Petermanns Mitth. 1855, I, p. 244. 253. 256.
2) BU DERBA, Zeitschr. f. Allg. Erdkunde. Berlin 1860, p. 477.
3) VON BARY, Zeitschr. d. Vereins f. Erdkunde. Berlin 1876, p. 164.
4) G. ROHLFS, Petermanns Ergänz.-Hefte XXV, p. 18.
5) GLASER, Zeitschr. d. Vereins f. Erdkunde. Wien 1887, p. 24.
6) Petermanns Mitth. XXII, p. 337.

Digitized by Google

überzogen. Ich hatte von Anfang an keinen Zweifel, dass dieser dünne Überzug aus Mangansuperoxyd besteht, was auch die Analyse bestätigte. (In einigen Fällen fand ich das Mangan von Eisen und Spuren von Nickel begleitet.) Häufig, ja fast in der Regel bemerkt man beim Auflesen eines schwarz gefärbten Steines, dass die Unterseite roth ist, was auf einen Einfluss des Lichtes in der Entwicklung des Peroxydes hindeutet. Ferner scheint der Mangangehalt der Felsarten selbst in vielen Fällen dabei betheiligt zu sein, denn gerade die Granite, die einen amethystfarbenen Quarz als Gemengtheil haben, zeigen den schwarzen Überzug am meisten.«

Eine Analyse einer solchen Kruste auf Nubischem Sandstein der libyschen Wüste veröffentlichte v. Zittel[1]) nach den Angaben Wingard's. Derselbe fand Eisenoxyd zu 36%, Manganoxydul zu 30% und andere Gemengtheile in geringerer Menge, wie aus seinem Protokoll hervorgeht:

Manganoxydul	30,57
Sauerstoff	4,04
Baryumoxyd	4,89
Thonerde	8,91
Eisenoxyd	36,86
Kieselerde	8,44
Wasser	5,90
Posphorsäure	0,25
	99,86

Die oben angeführten Literaturangaben zeigen, welche universelle Verbreitung die Schutzrinde in der Wüste hat; jetzt haben wir das Auftreten derselben im Einzelnen zu besprechen. In der Felswüste wie in der Kieswüste beobachtet man die Schutzrinde, am anstehenden Fels wie an freiliegenden Blöcken, und zwar hat die Eigenfarbe des Gesteins keinen Einfluss auf die Intensität der Färbung der Schutzrinde. Rothbraune Sandsteine werden ebenso braun wie weisse Sandsteinbänke, gelbe Kalke ebenso wie weisser Feuerstein. Nur das lässt sich durchgehends beobachten, dass die Farbe desto dunkler ist, je mehr Kieselsäure das Gestein enthält. Kalk ist

1) Zittel, Beiträge zur Geologie und Paläontologie der lybischen Wüste. Palaeontographica. Bd. XXX, p. 59.

im allgemeinen weniger braun gefärbt als Sandstein, Jaspis oder Flint; gewisse Kreidekalke färben sich fast gar nicht, tertiärer Korallendolomit vom Dj. Hamām Mûsa mit 6,88% OSi_2 ist dunkelbraun geworden.

Ja es scheint sogar, dass nur eine gewisse Modification der Kieselsäure sich für die Bräunung eignet, denn die bekannten weissen Verwitterungsrinden von Feuerstein, die durch Wasserverlust aus dem wasserhaltigen Chalcedon entstehen, färben sich nicht braun oder schwarz.

Im Allgemeinen finden wir also Kalk hell bis dunkelgelb, Sandstein, Dolomit dunkelbraun, manchen Granit, Jaspis, Feuerstein schwarz gefärbt, und es gewährt einen ungemein seltsamen Anblick, eine mit schwarzbraunen, fettglänzenden Kieseln bedeckte Sserirfläche oder eine dunkelbraune Sandsteinwand zu sehen, an welcher die natürliche hellgelbe Farbe des Gesteines überall da erscheint, wo sie verwittert oder durch Sandgebläse angefressen wird. An freiliegenden Blöcken und Geröllen s. Taf. VI, Fig. 2 bemerkt man sodann regelmässig, dass die besonnte Oberseite dunkler gefärbt ist, als die beschattete Unterseite, ja ich habe Quarzgerölle gesehen, welche zur Hälfte aus einer Bank des Nubischen Sandsteines (am Dj. Nakûs) herausragten und die soweit gebräunt waren, als sie dem Lichte zugänglich waren, während ihre im Gestein verborgene Oberfläche keinerlei Färbung erkennen liess.

Gewöhnlich sind die Gesteine (soweit sie nicht beschattet sind) gleichmässig gefärbt, allein es kommen sehr lehrreiche Ausnahmen von dieser Regel weitverbreitet vor. Wenn Versteinerungen in einem Kalk enthalten sind, so werden dieselben oft viel dunkler gefärbt, als die Gesteinsmasse, und besonders sind es Nummuliten, die in gewissen Kalken stark gebräunt auf gelblichem Grunde erscheinen Keineswegs liegt es an den Nummuliten als solchen, denn die Nummuliten an den Pyramiden von Giseh findet man ohne braune Färbung, und ebensowenig am Mokkatam oder in gewissen eocänen Kalkgebieten der arabischen Wüste und der Sinaihalbinsel. An anderen Orten aber ist der Boden ganz bedeckt mit bräunlichen Kalkbrocken, auf denen schwarzbraune Nummuliten in grosser Menge erscheinen. Besonders ausgezeichnet beobachtet man Solches im Uâdi Dugla am Fusse der S. 69 erwähnten Rampe s. Fig. 99, gegenüber der Lyciumschlucht. Man kann sich leicht überzeugen, dass auch hier eine dünne Farbschicht

Digitized by Google

auf den Nummuliten liegt, dass sie im Bruch ebenso weiss erscheinen wie der oberflächlich gebräunte Kalk, der sie umschliesst.

Taf. VI, Fig. 4, 5, 6, 7 habe ich solche Nummulitenkalke dargestellt, deren Fossilien stark gebräunt erscheinen, Fig. 7 ist aus dem Uâdi Ashar (südl. Galâla), die übrigen vom Uâdi Dugla bei Cairo. Die kleinen Nummuliten sind zugleich aus dem Gestein durch Deflation herausmodelliert und sitzen z. Th. wie ein Gletschertisch auf einem 1—2 mm hohen Stiel. Der untere Nummulit auf Fig. 4 ist von seinem Stielchen losgebrochen; ich habe ihn umgekehrt darauf gelegt um zu zeigen, dass die Nummuliten im Innern des Gesteins ganz weiss sind und von der Unterfläche nur soviel geschwärzt wurde, als randlich über den Stiel herausragte; diese Zone erscheint als schwarzer Ring.

Taf. VI, Fig. 3 ist ein Stück Feuerstein, das an den frisch erzeugten drei Bruchflächen hellgrau ist, auf der Oberfläche aber fast schwarz geworden ist; die Unterseite ist nur kaffeebraun gefärbt, und alle auf der weissen senonen Kreide, östlich vom Kloster St. Anton herumliegenden derartigen Flintscheiben zeigen stets dieselbe Erscheinung. Fig. 2 derselben Tafel ist ein Quarzgeröll, welches auf seiner oberen besonnten Seite etwas geschwärzt, auf der Unterseite aber vollkommen ungefärbt ist.

Ganz vortreffliche Beispiele bietet das Uâdi Ashar in der südlichen Galâla, wo grosse und kleine schwarzbraune Nummuliten auf hellem Kalke erscheinen, und oft bietet die Anordnung dieser schwarzbraunen Nummuliten interessante Thatsachen. So beobachtete ich eine Wand, an der die Nummuliten, wie beistehende Zeichnung s. Fig. 61 erkennen lässt, zu Kreisen angeordnet waren, die 10—15 cm grosse runde Nummuliten-freie Flächen umschlossen. Ich vermuthe, dass dieser Kalk aus Lithothamnium ähnlichen Algenknollen zusammengesetzt wurde, zwischen denen ein mit Nummuliten durchsetzter Kalksand in allen Lücken abgelagert war. Von der Algenstructur ist nichts mehr zu erkennen, nur die einstigen Umrisse der (?) Algenknollen treten jetzt hervor.

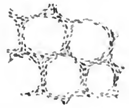


Fig. 61. Nummulitenkalk im Uâdi Ashar.

Aber nicht nur Nummuliten werden in der Wüste derartig

Digitized by Google

gebräunt, auch andere Fossilien erleiden lokal dieselbe Veränderung. Gryphaea vesicularis, schwarzbraun gefärbt, entnahm ich einem hellen Kreidekalk über der Quelle Ayin Marchâ; Exogyra, Echinodemenreste Radiolites oder Actaeonella, u. a. fand ich ebenso gebräunt vor. Immer aber sind es bestimmte Localitäten, an denen die Fossilien derartig verändert erscheinen.

Sicher ist endlich, dass die gebräunten Felspartien härter und widerstandsfähiger sind, als die nicht gefärbten; aber ich vermag in einzelnen Fällen nicht zu entscheiden, ob solches eine Ursache oder Wirkung der braunen Schutzrinde ist. Ich vermuthe das letztere, und bei den Rinden der Sandsteinfelsen lässt es sich durch den Hammer beweisen.

Endlich habe ich schon erwähnt, dass die Bildung der braunen Schutzrinde bis in die Gegenwart fortdauert, dass die Felsen von Turra im Laufe von 4000 Jahren die Bräunung erlitten haben, und dass sogar die Quadern auf der Pyramidenspitze Anfänge dieser Erscheinung zeigen. Ziehen wir aus allen diesen Thatsachen die Summe, so ergeben sich folgende Resultate:

Die braune Schutzrinde ist eine Erscheinung, bedingt durch das Wüstenklima. Sie ist abhängig erstens von der Besonnung, zweitens von einem gewissen Kieselsäuregehalt des Gesteins, und die färbenden Mangan- und Eisentheile stammen nicht aus dem gefärbten Gestein. (Denn wenn das letztere der Fall wäre, so müssten mangan- und eissenreiche Gesteine allein gebräunt werden, während ein schneeweisser Sandstein oder Kalk oder Flint unmöglich sich färben könnte.) Endlich scheint es sicher zu sein, dass die Mangansuperoxydrinde nicht unter dem Einfluss wässriger Lösung gebildet wird, denn sie entsteht gerade da am besten, wo Wasser nie oder selten hingelangt (und dass sich ähnliche Rinden am Ufer tropischer Flüsse bilden, ist ohne Bedeutung für dieses in der wasserlosen Wüste so weit verbreitete Phänomen).

Ich will hier nicht den Vermuthungen Ausdruck verleihen, die ich über die Bildung der Schutzrinde hege, ich will nur darauf hinweisen, dass die intensive Hitze der Wüstenluft wohl imstande sein kann, die Hülfe lösenden Wassers zu ersetzen, und dass der Thonstaub, welcher die Wüstenluft so oft erfüllt und der vom Wind gegen alle Felsen getrieben wird, Mangan und Eisen enthalten kann, um die färbenden

Digitized by Google

Metallsalze zu bilden. Doch vermeide ich die Frage weiter zu discutiren, es liegt hier ein chemisches Problem verborgen, das einer besonderen Untersuchung harrt.

Die neuerdings veröffentlichten Untersuchungen Sickenberger's[1]) zeigen, welche räthselhaften chemischen Vorgänge in dem Wüstenklima Aegyptens vor sich gehen, indem dort nachgewiesen wurde, »dass der kohlensaure Kalkstaub unter dem Einfluss des grossen und raschen, dem Klima eigenen Temperaturwechsels, gleichwie unter directer Besonnung, die in dem langen Sommer oftmals Erhitzung bis 90° C. bewirkt, etwas Kohlensäure verliert, jedenfalls genug um auf die amorphe Kieselerde bei Gegenwart von Wasser einzuwirken, wie gebrannter Kalk auf krystallisirten Kieselsand, die Bildung von kieselsaurem Kalk bewirkend«. Ich glaube, dass die weiteren Untersuchungen Dr. Sickenberger's auch das Räthsel der Bildung der braunen Schutzrinde seiner Lösung entgegenführen werden.

4. Die Säulengänge und Pilzfelsen.

Die für den Beobachter sonderbarste und um es gleich auszusprechen, am schwersten verständliche Erscheinung in der Wüste sind jene von regelmässigen Fenstern durchbrochenen Felswände, welche ich als »Säulengänge« bezeichnen will. Der räthselhafte Vorgang der oberflächlichen Verhärtung der Felsen, den ich in dem vorhergehenden Abschnitte geschildert habe, verbindet sich mit dem Vorgang einer theilweisen späteren Entfernung der Schutzrinde, um eine überaus sonderbare und problematische Erscheinung hervorzurufen.

Es ist mir nicht gelungen, in der Literatur genaue Beschreibungen dieser Säulengänge zu finden, vielleicht habe ich die Schilderungen der Autoren nicht zu verstehen vermocht; aber ich habe die Säulengänge auf meiner Reise oftmals beobachtet. Professor Schweinfurth stellt ihre weite Verbreitung in der Arabischen Wüste fest, und nach mündlichen Mittheilungen des Freiherrn von Meckel, welcher die östliche Sinaihalbinsel und die syrische Wüste kennen gelernt hat, treten die Säulengänge auch dort auf. Er verglich sie mit den

1) Zeitschrift der deutsch. geol. Gesellschaft. Berlin 1889, p. 314.

Digitized by Google

Tunnelgallerien der Axenstrasse; thatsächlich lässt sich die Erscheinung am besten mit einem Tunnel vergleichen, welcher im Innern einer Felswand dahinziehend durch rundliche Lücken mit der Aussenwelt in Verbindung steht. Ich habe am Sinai am Dj. Nakûs s. Fig. 62 Säulengänge gesehen, deren Gang etwa 30 cm hoch, deren Fenster 20 cm hoch und 5—10 cm breit waren, ich habe solche im Uâdi Omm Ruthi s. Fig. 63 auf der südlichen Galâla beobachtet, deren Tunnel 1 m hoch, ½ m breit, deren Fenster 80 cm hoch und 30—40 cm breit waren. In oft regelmässigen Abständen durchbrechen diese Fenster die Felswand, um sich zu einem gemeinsamen Gang hinter der Felsrinde zu verbinden, und mit Unterbrechungen lassen sich diese Säulengänge an langen Felsbänken verfolgen.

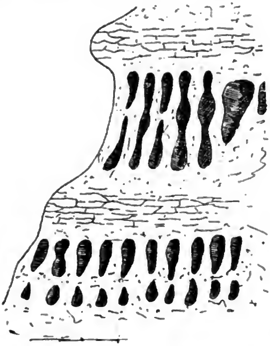


Fig. 62. Säulengänge im Sandstein des Dj. Nakûs.

Fig. 63. Ausgehöhlte Kalkfelsen im Uâdi Omm Ruthi (südliche Galâla).

Die Säulengänge finden sich am Dj. Nakûs im Nubischen Sandstein, auf der südlichen Galâla im Nummulitenkalk und im Uâdi Ashar s. Fig. 64 fand ich sie sogar in der Wand einer Schotterterrasse eingesenkt. Nur im Granit habe ich sie nicht gesehen, wenn man nicht die Höhlen, welche schichtenweise im Lagergranit vertheilt sind (s. o. Fig. 6), als eine Art Säulengänge in statu nascendi auffassen will. Die Schilderung der Säulengänge gehört eigentlich in den Abschnitt Felswüste, aber da sie im engen Zusammenhange mit

Digitized by Google

der Schutzrinde zu stehen scheinen, so will ich sie im Anschluss an diese hier behandeln.

Wir sahen in dem vorhergehenden Abschnitt, dass die Bildung der braunen Schutzrinde eine oberflächliche Verhärtung der Felsen erzeugt, die sich dem Sandgebläse und der Verwitterung gegenüber als sehr widerstandsfähig erweist. Durch einen mir nicht verständlichen Vorgang (vielleicht durch gelegentlich an der Wand herabrieselndes Regenwasser) werden verticale Streifen von dieser braunen oder gelben Schutzrinde losgelöst und die Wüstenkräfte beginnen bald sich dort in den Felsen hineinzufressen. Ob hierbei mehr die Verwitterung im Schatten, ob mehr das Sandgebläse wirksam ist, kann ich nicht sagen. Jedenfalls entstehen auf diesem Wege (Übergänge habe ich beobachtet) immer tiefer werdende senkrechte Mulden, welche sich bald seitlich im Innern des Felsens erweitern s. Fig. 65 u. 66. Indem diese Erweiterung immer bedeutender wird, vereinigen sich die be-

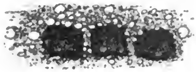


Fig. 64. Säulengang im Schotter an den Gehängen des Uâdi Ashar.

Fig. 65. Ausgehöhlte Sandsteinfelsen im Uâdi Hascheb.

nachbarten Höhlen hinter den stehenbleibenden gebräunten Säulen und bilden allmählich einen Gang, der durch eine Reihe von Löchern mit der Aussenwelt in Verbindung steht und sich hinter einer Reihe von Säulen im Felsen entlang zieht. Beifolgende Zeichnung s. Fig. 62 giebt eine solche von Löchern durchbrochene Sandsteinwand vom Dj. Nakûs wieder, etwas unregelmässiger sind die Löcher auf der anderen Fig. 65 vom Uâdi Hascheb. Ganz hohe Sandsteinwände sind Kilometerlang von solchen Höhlen und Gängen unterminirt, und zeigen alle Stadien der Bildung und des Verfalls. Die Gänge sind oft nur einen Fuss hoch, bisweilen aber so geräumig, dass ein Mensch im Innern gebückt gehen könnte, und lustig sieht es aus, wenn eine fusslange Wüsteneidechse bald aus dem einen, bald aus dem andern

Digitized by Google

Fenster herausschaut, um dann wieder in dem inneren Gang zu verschwinden.

Die Vermuthung, dass diese Gebilde künstlich von Menschenhand gemacht seien, ist ganz ausgeschlossen.

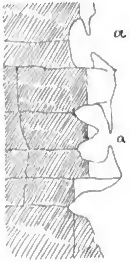


Fig. 66. Durchschnitt durch eine Säulengallerie in Uâdi Hascheb.

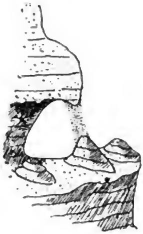


Fig. 67. Zerstörte Säulengalerie am Dj. Nakûs (die Säule ist punktiert gezeichnet).

Im Innern des Ganges findet starke Verwitterung im Schatten statt und indem sich der Gang allseitig immer mehr erweitert,

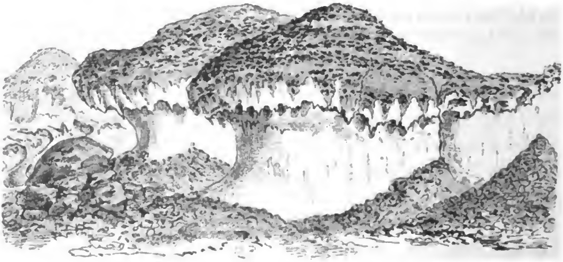


Fig. 68. Pilzfelsen im Uâdi Tarfeh 15 km östlich von Mattai nach einer Tuschzeichnung von G. SCHWEINFURTH.

durchbricht er von Innen heraus endlich auch die Säulen, dann sieht man ein Stadium (s. Fig. 67), wo der Gang halbgeöffnet oben und

Digitized by Google

unten eine Reihe zapfenartiger Fortsätze trägt, deren (punktirt gezeichneter) ursprünglicher Zusammenhang ganz klar vor Augen liegt. Spalten, die das Gestein durchziehen, können diesen Zerstörungsprozess sehr beschleunigen, indem ganze Felswände abbrechen, wie obenstehende Fig. 66 erkennen lässt. Bei a sind solche halbgeöffnete Gänge im Verticalschnitt dargestellt. Sobald die

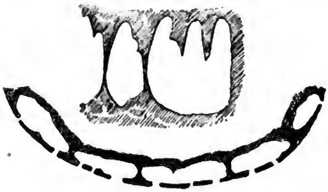


Fig. 69. Aussenfläche und Durchschnitt eines Pilzfelsens nach G. Schweinfurth.

nicht schraffirte Felspartie sich ablöst, brechen alle Säulengänge auf und nur ihre Rückseite ist im Gestein noch erkennbar. Das Uâdi Hascheb bietet eine grosse Fülle derartiger Vorkommnisse. Wie hier und am Dj. Nakûs im Sandstein, so fand ich dieselben Säulengänge

Fig. 70. Durch Deflation isolierter Sandsteinpfeiler im Arabahgebirge.

im Uâdi Omm Ruthi s. Fig. 63 auf der Höhe der südlichen Galâla im eocänen dichten Kalk, nur dass hier die Eingänge weniger zahlreich und breiter, die Gänge dahinter geräumiger waren. Sehr überraschend aber war es mir, ganz ähnliche, wenn auch viel kleinere Bildungen in einer Schotterterrasse am linken Ufer des Uâdi Ashar s. Fig. 64 kurz vor dessen Austritt aus der südlichen Galâla zu finden.

Digitized by Google

Das lehrt uns, dass die Erscheinung keineswegs abhängig ist von der Zusammensetzung des Gesteins, sondern dass sie mehr mit klimatischen Bedingungen zusammenhängt. Ich habe Eingangs schon die Bildungsweise erläutert, wie man sie direct beobachten kann; über die Ursachen, weshalb so locale Durchbrechungen der Schutzrinde

Fig. 71. Pilzfelsen aus der Oase Ghara genannt »die Säule des Pharao« nach einer Photographie von L. B. ROBECCHI.

erfolgen, die dann in ihrer Weitervertiefung Anlass zu den Gängen geben, kann ich keine Beobachtungen anführen.

Auf Taf. I, Fig. 6 ist ein Kalkstück zur Darstellung gekommen, welches ausgehöhlt ist ohne Bildung einer schwarzen Rinde, und

Digitized by Google

das uns zeigt, dass die Bildung der letzteren keine bestimmende Rolle bei der Bildung hohler Gesteine spielt. Es stammt von einer Felswand bei Turra und ist mit 1 cm tiefen Höhlungen durchzogen, die durch Verwitterung einen Schatten auf die soeben beschriebene Art entstanden sind.

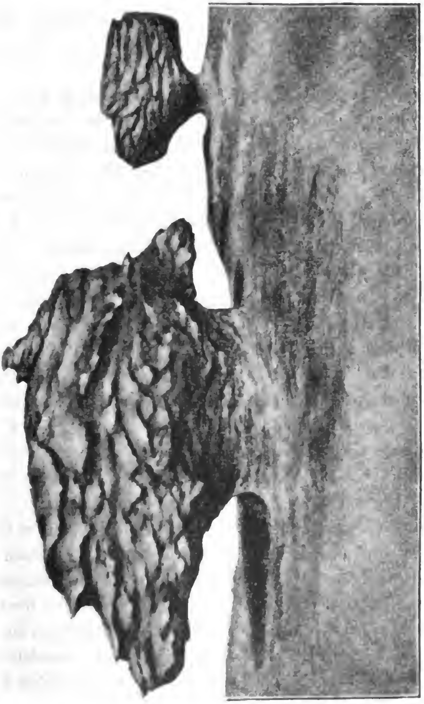


Fig. 72. Pilzfelsen aus der Oase Ghara genannt »Kamel und Pferd des Pharao« nach einer Photographie von L. B. Robecchi.

Nahe verwandt mit den Säulengalerien und auf ähnliche Ursachen zurückzuführen ist die Bildung der sonderbaren Felsgebilde, die ich als »Pilzfelsen« bezeichne s. Fig. 68, 69, 71, 72. In der Literatur habe ich

Digitized by Google

wenig darüber gefunden, nur der treffliche Beobachter VON BARY[1]) giebt folgende Schilderung: »In Tásili sind Felsen häufig, deren Form und Gestalt Pilzschwämmen ähnlich sieht, indem ein mächtiger Block nur auf schlanker Basis ruht, über die er mit ausgehöhltem Rande weit hinausragt. An einer Stelle finden sich drei dieser Steintische dicht neben einander. Gegenwärtig ist keine Spur eines früheren Flussbettes dort vorhanden.« Auch DUVEYRIER erwähnt[2]) ähnliche Bildungen und bildet die Blocs de Takarâhet ab, unter deren überhängendem Rande ein Reiter Platz hat.

Isolierte Blöcke von grösseren Dimensionen bilden sich in der Wüste auf zweierlei Weise: entweder sind es von einer Felswand herabgebrochene Stücke, oder sie sind bei der Deflation in situ isoliert, wie man das auf obenstehender Figur 70 aus dem Arabagebirge mit Deutlichkeit erkennen kann. Solche isolierte Blöcke werden nun leicht, sofern sich ihr Gestein dazu eignet, von der braunen Schutzrinde umgeben, wenigstens auf ihrer oberen Hälfte. Der Fuss wird durch Sandgebläse und Verwitterung allmählich corrodiert und verkleinert, während die Oberseite durch die Schutzrinde widerstandsfähig geworden ist. Ein ähnlicher Vorgang, wie bei der Bildung der Säulengänge, durchlöchert bisweilen auch hier die schützende Rinde, und hier wie dort beginnen die Wüstenkräfte sich hineinzubohren. Auf diese Weise entstehen Pilzfelsen mit weit überhängendem ausgezacktem Rand, wie ich sie oft s. Fig. 8 beobachtet habe, aber nirgends so schön, wie sie obenstehende Zeichnung G. SCHWEINFURTH's wiedergiebt aus dem unteren Uâdi Tarfeh 12—15 Kilometer östlich von Mattai. Die pilzähnlichen Kalkstücke, welche durch Deflation aus einer grösseren Felsmasse herausmodelliert worden sind, haben etwa 5 m Höhe und ebensoviel Breite. Fast einen Meter breit ragt der gebräunte Hut über einen weissen Stiel hervor, und mit zackigem Rande hebt sich die braune oberflächliche Rinde von der weissen Farbe des Kalkgesteines ab. Hohe Schuttkegel am Fusse des Felsen legen Zeugniss ab von den intensiven Denudationsprozessen, welche gewirkt haben, um eine so sonderbar gebildete Felsenform zu erzeugen. Nicht weniger seltsam ist die Gestalt der drei

1) Zeitschr. d. Vereins f. Erdkunde zu Berlin. 1876, p. 178.

2) Les Touareg du Nord, p. 35 u. 57.

Digitized by Google

Pilzfelsen, welche auf Fig. 71 u. 72 nach Photographien des Ingenieur's Robecchi (die ich der Güte des Herrn Professor Schweinfurth verdanke) dargestellt sind. Sie finden sich in der Oase Ghara und sind unter den Namen »Säule des Pharao« und »Kamel und Pferd des Pharao« bekannt. Ich will damit die Behandlung der sonderbaren Gebilde, die im Gefolge der braunen Schutzrinde entstehen, abschliessen; manch anderes ähnliches Phänomen der Wüste konnte hier nicht ausführlich behandelt werden, denn alles dies sind geologisch untergeordnete Erscheinungen, entstanden durch ein verwickeltes Zusammenwirken verschiedenartiger Bedingungen.

5. Das versteinerte Holz.

Als eine Begleiterscheinung der Kieswüste darf man das verkieselte Holz betrachten, welches in vielen Theilen der ägyptischen Wüsten beobachtet wurde, und dessen berühmtestes Vorkommen auf dem Ostflügel des Mokkatamgebirges ist, nördlich vom Uâdi Dugla, am Dj. Chaschab, dem »grossen versteinerten Wald« der Reisenden. Hier sieht man s. Fig. 73 u. 74 zwischen sandgerundeten braunen Kieseln, auf hügeligem Boden eine grosse Anzahl von kleinen und grossen Bruchstücken der Nicolia aegyptica herumliegen und oft liegen diese Holzscheite noch so weit in Zusammenhang, dass man die Länge der Stämme zu 25—27 m bestimmen kann. Die Sonne hat die Stämme zersprengt und in einzelne Scheite zerlegt.

Das Holz ist mikroskopisch wohlerhalten und ist von einer Reihe von Forschern untersucht worden. Russegger[1]) glaubte allerdings, dass das fossile Holz der Wüste eine Art Concretion sei. »Der Sandstein von Cherery ist auch voll jener eigenthümlichen kieseligen Concretionen von äusserlich holzähnlichem Ansehn, die man häufig als versteinertes Holz der Wüste benennen hört und die wir bereits aus den Kreidegebilden des nördlichen Afrika kennen.« Dagegen haben später Trémeau[2]), Unger[3]), Schenk u. A. es ausser Zweifel

1) Neues Jahrbuch für Mineralogie, 1838, p. 625.

2) Trémeau, Voyage dans le Soudan.

3) Unger, Sitzungsber. d. K. Acad. d. Wissensch. Math.-phys. Classe. Wien 1859, p. 209.

Digitized by Google

gestellt, dass verkieseltes Pflanzengewebe vorliegt. UNGER beschreibt sogar schmarotzende Mycelien von Nyctomyces entoxylinus im Parenchym des Holzes. Die erste mikroskopische Untersuchung des

Fig. 73. Nicolienstamm am grossen versteinerten Wald bei Cairo nach einer Photographie von Dr. SARASIN.

fossilen Holzes aus Ägypten wurde von W. NICOL[1]) gemacht, welcher es von Vere Monro erhalten hatte.

1) JAMES, Edinb. n. phil. Journ. 1835, XVIII, p. 335.

Digitized by Google

Wurzeln und Aeste werden nicht gefunden, dagegen besitze ich selbst Stücke, in denen Astansätze ganz deutlich erkennbar sind. Auch Rindenstücke werden nicht beobachtet, wenn man nicht eigen-

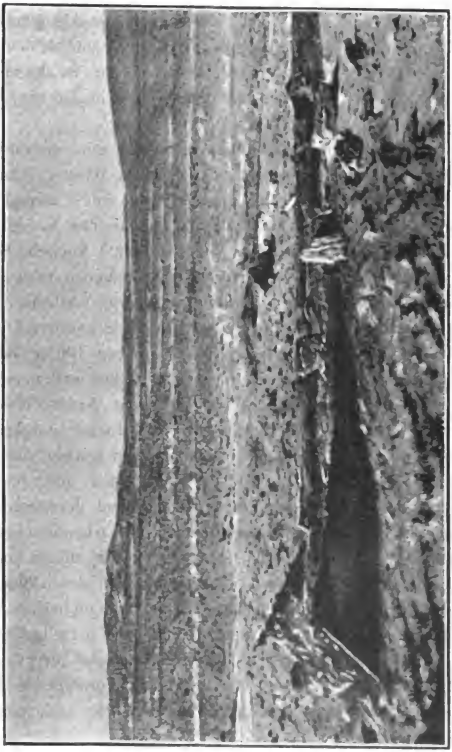


Fig. 74. Nicolienstamm am grossen versteinerten Wald bei Cairo nach einer Photographie von Dr. Sarasin.

thümliche mit Warzen bedeckte Stücke als Reste der Rinde ansprechen darf. Taf. VIII, Fig. 6 ist ein solches warzenbedecktes Stück, das vom grossen versteinerten Wald stammt. Da ähnliche

Digitized by Google

Stücke dort nicht selten sind, glaube ich, dass eine organische Bildung vorliegt, vielleicht ein Abguss der Rinde. oder der Oberfläche des Holzkörpers.

Die Hölzer liegen zusammen mit Stücken einer Kieselbreccie, deren Fragmente bald rund, bald eckig durch speckig glänzende Kieselmasse verkittet ist, und die als ein Gestein ähnlich dem des Dj. Achmar bei Cairo erkannt wird. Sowohl der Sandstein des Dj. Achmar, wie der des versteinerten Waldes liegen über dem Eocän.

Man hat solche junge Sandsteine zusammen mit versteinertem Holz in verschiedenen Gebieten der Ägyptischen Wüsten gefunden und die Gleichzeitigkeit dieser Bildungen wahrscheinlich gemacht.

Bekanntlich findet sich unterhalb der ägyptischen Kreide eine mächtige Ablagerung von Sandstein, der sogenannte Nubische Sandstein, in welchem ebenfalls versteinertes Holz gefunden wird. Die mikroskopische Structur dieses Holzes zeigt grosse Ähnlichkeit mit der des nacheocänen Holzes, allein mit Recht hat SCHWEINFURTH[1]) die Identität beider Hölzer bezweifelt. »Die fraglichen Hölzer mögen der Familie der Sterculiaceen zugerechnet sein, aber erst muss der Beweis geliefert werden, dass zwei verschiedene Arten derselben wirklich auch verschiedene Merkmale ihrer Holzstructur zu erkennen geben müssen, bevor ich der Annahme beipflichten möchte, die versteinerten Hölzer von Cairo, die der grossen Oase und die von Magdala in Abessinien stammten alle von ein und derselben Art, blos weil sich in ihrem Holzbau keine Unterschiede nachweisen liessen. Dass ein Repräsentant der Sterculiaceen bereits in den älteren Formationen gelebt haben kann, ist nicht unwahrscheinlich, diese Pflanzenordnung besitzt in ihren Merkmalen eine scharfausgeprägte Individualität und ist einer unendlichen Reihe von Combinationen derselben fähig. Dagegen erscheint der Formenkreis dieser Ordnung in der Gegenwart weit zu arm und zu eng, um nicht ein Vorhergehen vielgegliederter Entwickelungsreihen als wahrscheinlich erscheinen zu lassen.«

Wenn wir also das Problem kritisch betrachten, so muss Folgendes festgestellt werden:

---

1) Zeitschr. der deutsch. geol. Gesellsch. 1882, p. 139.

Digitized by Google

Versteinertes Holz findet sich in Ägypten in vorcretaceischen und in nacheocänen Ablagerungen, beide von einander getrennt durch die über 1000 m mächtigen Sedimente von Kreide und Eocän. Eine Identität beider Holzarten ist nicht nachgewiesen.

Demzufolge glaube ich auch beide Erscheinungen trennen zu sollen, um so mehr als die Einbettungsmasse der vorcretaceischen Hölzer, der Nubische Sandstein, ganz andere Eigenschaften besitzt als der Sandstein des Dj. Achmar, in welchem die tertiären Hölzer liegen. Wir haben zwei ganz verschiedene Sedimente verschiedenen Alters, beide durch den Gehalt an fossilem Holz ausgezeichnet, aber beide Thatsachen stehen in keinem causalen Zusammenhang und es lässt sich nicht beweisen, dass die tertiären Hölzer ursprünglich im Nubischen Sandstein gelegen haben und erst secundär ins Neogen gekommen sind.

So müssen wir das bisher einheitlich behandelte Problem in zwei Probleme gliedern, wir müssen zuerst die Entstehung der Hölzer im Nubischen Sandstein discutieren, und dann ganz unabhängig hiervon die Hölzer des Neogen besprechen.

Die verkieselten Hölzer des Nubischen Sandsteins, welche ZITTEL sammelte, gehören nach den Bestimmungen SCHENK's[1]) zu Palmacites Zitteli, Dadoxylon Aegyptiacum, Nicolia aegyptica und einer anderen Dicotylen. Die Baumstämme, z. Th. von ansehnlichen Dimensionen, finden sich am häufigsten in den weicheren Lagen des Nubischen Sandsteins. Sie wittern leicht aus, so dass Trümmer von verschiedener Grösse in Menge auf dem Sandsteinplateau zwischen Dachel und Regenfeld herumliegen. Westlich von Dachel kommen sie mit obercretaceischen Haifischzähnen auch noch in den marinen Mergeln der oberen Kreide vor.

»Der[2]) Nummulitenkalk verwittert zu losem Staub und Sand, während seine, grösstentheils aus Kieselerde bestehenden Einschlüsse nicht verwittern, sondern an Ort und Stelle liegen bleiben, während die heftigen Wüstenwinde den Staub und Sand hier wegführen, dort anhäufen, damit manche Gegend weit und breit herum bedecken,

---

1) Über den geol. Bau der Lybischen Wüste. Festrede, Acad. d. Wissensch. München 20. März 1880, p. 29.

2) RUSSEGGER, Neues Jahrbuch f. Mineralogie, 1836, p. 690.

Digitized by Google

an manchen Stellen aber wieder das Gestein entblösen, so dass die Verwitterung aufs Neue beginnt. So können diese Feuersteine, Karniole, das fossile Holz u. dergl. durch Jahrtausende liegen bleiben und vermehren sich zum Theil ihrer Anzahl nach durch die fortschreitende Verwitterung.«

Ich fand im Uâdi Arabah, in dem Nubischen Sandstein, etwa 50 m über dem Kohlenkalk Stämme von fossilem Holz eingeschlossen und in demselben Niveau am Abhang der nördlichen Galâla. Auf Grund mikroskopischer Untersuchung dieser Hölzer urtheilte Prof. SCHENK[1]: »So lange keine anderen Reste, namentlich Früchte, Samen, Blätter, vorliegen, kann aus dem Holz nichts über das Alter der Schichten festgestellt werden, denn diese Hölzer gehören zu der Kategorie derjenigen Coniferen, deren Textur den Araucarien entspricht. Durch Tüpfel der Tracheiden, die mehrreihig sind, unterscheiden sie sich von den von UNGER beschriebenen; Araucarioxylon aber d. h. Coniferen mit Araucarienstructur im Holz ist von den ältesten Schichten bis zum Tertiär verbreitet. In den älteren Formationen sind bisher nur Hölzer gefunden worden, die Araucarienstructur zeigen, trotzdem sie zu verschiedenen Coniferengattungen gerechnet werden, die man nach den Zapfen etc. unterscheidet.«

Das Sediment, welches diese Hölzer einschliesst, scheint mir eine Dünenbildung des Festlandes zu sein, marine Fossilien fehlen in den Bänken, die Hölzer sprechen ebenfalls für Festland und die Diagonalschichtung (s. u.) der Sandsteine ist ein weiterer Beweis dafür. Unsere Aufgabe ist es demnach zu suchen, ob in recenten Flugsandbildungen ähnliche Einschlüsse vorkommen.

Versteinerte Wurzeln von Tamarix gallica fand VOGEL[2] in grosser Menge in Sandhügeln zwischen Mursuq und Mafun.

»An der oberen Grenze der kurischen Nehrung[3] kämpfen Vegetation und Dünensand einen ungleichen Kampf. Der Wald duldend, ausharrend, soweit die Lebenskraft reicht, der fliegende Sand unaufhörlich angreifend, bis ein Stamm nach dem andern erliegt. Zuerst wird dem Vorposten die alte Rinde, der Panzer, stückweise abgerieben; Bäume, die in dieses Stadium getreten sind, haben in

1) Brief an G. SCHWEINFURTH 1888.

2) Petermanns Mitth. 1856, p. 169.

3) J. SCHUMANN, Neue Preuss. Provinzialblätter III, 1. 1859.

Digitized by Google

ihrem hellbraunen Unterkleid zwar ein frisches Aussehen, doch sind sie bereits dem Tode geweiht. Denn bald werden auch die Blätter der jungen Rinde abgerissen, und dadurch die Lebensschicht des Baumes zu Tage gelegt. Der Baum stirbt ab und verliert beim ersten Sturme den Wipfel, oder er bricht wohl auch nahe an der Wurzel ab. Beim Vorrücken der Düne wird der Stumpf allmählich verschüttet. (Auf der Haffseite werden die Bäume begraben und sterben dann erst ab, wobei die Rinde am längsten dauert und Röhren bildet, in die man versinken kann.) Tritt der todte Baum auf der Nordseite der Düne wieder heraus, so wird das verrottete Holz ganz zu Atomen verweht, nur feste Stämme halten Stand.«

Nach v. Wrede[1]) finden sich in geringer Entfernung der Sandberge vom Uâdi Mayfaah (Hadramaut) einige Sandhügel, welche bereits zu einem lockeren Sandstein umgewandelt sind; in ihnen stehen mehrere, theils abgestorbene, theils noch grünende Bäume, welche letztere aber auch schon kümmerlich ihr Dasein fristen.

Ich glaube, dass die eben betrachteten Thatsachen das Räthsel der Hölzer im Nubischen Sandstein erklären, und dass wir in diesen somit Baumstämme zu erblicken haben, welche beim Wandern der Dünen in die Sandmasse gekommen sind, ihrer Äste und Rinden beraubt wurden, abknickten und später von schwachen Kiesellösungen durchtränkt wurden, die in dem Sande circulierten. Inwieweit hierbei ein ursprünglich organisch ausgeschiedener Kieselsäuregehalt des Pflanzengewebes mitwirkte, den Krukenberg[2]) annahm, entzieht sich der Beobachtung.

Wenden wir uns jetzt dem anderen Hölzerproblem zu, und untersuchen wir die versteinerten Hölzer des jüngeren Tertiärs, welche wir in Ägypten beobachten. Auch diese finden sich in einem Sandstein, aber dieser Sandstein hat wesentlich andere Eigenschaften, als der vorher beschriebene. Auf die Gleichzeitigkeit der Holzeinbettung und der Bildung der Djebel Achmargesteine hat Schweinfurth[3]) hingewiesen:

»Die Masse des Dj. Achmar ist nicht homogen, sondern grosse

1) Zeitschr. des Vereins für Erdkunde. Berlin 1872, p. 233.

2) Chemische Untersuchungen zur wissensch. Medicin, 2. Heft, p. 221.

3) Zeitschr. der deutsch. geol. Gesellsch. 1882, p. 142.

Digitized by Google

Strecken eines gleichartigen glasigen, feinkörnigen Sandsteines wechseln ab mit solchen, deren Partikel einen nur losen Verband zeigen, ja mit losem Sand selbst. Eine Stratenbildung ist nirgends zu erkennen, die Richtung der Gliederung ist vielmehr eine perpendicu-

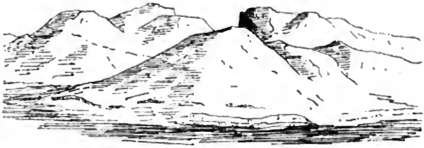


Fig. 75. Djebel Achmar bei Cairo (von Westen).

läre. Dieser Umstand hat bei der fortgesetzten Ausbeutung des vorzüglichen Gesteins zu technischen Zwecken, zu einer Verwirrung der ganzen Bergmasse geführt, indem nur die guten Stellen ausgebaut wurden und so der Gebel-el-Achmar unregelmässig durchfurcht und angehauen wurde, riesige Schutthalden sich bildeten und zur Verdeckung des Anstehenden und zur Verundeutlichung des geologischen Bestandes beitrugen. So ist es gekommen, dass dieser berühmte Hügel (bereits in Märchen von 1001 Nacht erwähnt), den die Natur ursprünglich als härteren, verkieselten Kern durch Erosion (Deflation!) herausgeschält hat, in Gestalt (s. Fig. 75) einer isolierten Kuppe

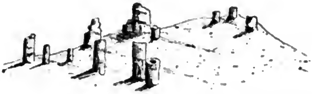


Fig. 76. Rothe Sinterröhren im Sandstein des Dj. Achmar (Nordseite).

Fig. 77. Sinterröhren im Sandstein des Dj. Achmar (Nordseite).

erscheint und durch diese Gestalt zu der Vorstellung eines vulkanischen Ursprungs beigetragen hat.«

Auf Taf. VIII, Fig. 1, 3 sind solche conglomeratische Sandsteine vom grossen versteinerten Wald dargestellt. Fig. 1 ist besonders interessant, denn es enthält eingebacken in ein sandiges Bindemittel,

Digitized by Google

ein gesprungenes Geröll, welches in seinem Habitus so übereinstimmt mit den auf Taf. I, Fig. 2. Taf. II, Fig. 6, 7, 8 dargestellten Geröllen aus der Kieswüste, dass ich in jenem Sprung einen Beweis für die Annahme erblicke, dass die Stämme des versteinerten Waldes unter einem Wüstenklima in den umgebenden conglomeratischen Sandstein eingebettet wurden.

SCHWEINFURTH nahm an, dass dieser Hügel eine Kieselsinter- oder Geysirbildung sei, und dass die versteinerten Hölzer durch dieselbe Ursache gebildet wurden. Freilich kannte man keine Sinterröhren, durch welche die Kiesellösung emporgedrungen sei, und diese Lücke der Beobachtung war ein gewichtiger Einwurf, den ZITTEL gegen SCHWEINFURTH geltend machte.

Inzwischen wurden solche Sinterröhren aber in Menge durch SCHWEINFURTH gefunden und beifolgende Zeichnungen Fig. 76, 77 geben diese Erscheinung vom Nordostfuss des Dj. Achmar wieder.

Auf Taf. VIII, Fig. 5 und 7 sind Fragmente solcher dunkelrother Sinterröhren auf dem Querbruch dargestellt, man sieht in das Röhrenlumen hinein.

RUSSEGGER[1]) hatte zwar die irrthümliche Ansicht, dass der Dj. Achmar (oder wie er schreibt G. Ahfrak) ein Vulkan sei, doch hat er richtig beobachtet, dass: »die Eruption durch die der Djebel Ahfrak entstanden ist, erst geschehen sein muss, als schon Wüste diesen Punkt bedeckte; denn man findet den Sand der Wüste von dem Zustand einer leichten Zusammenfrittung der Körner an bis zur vollendeten Lava«.

Wenn damit sehr wahrscheinlich gemacht ist, dass der Sandstein des Dj.-el-Achmar ein durch Kieselsinter verkitteter Wüstensand sei, so wird diese Annahme noch wahrscheinlicher durch den Nachweis, dass ich unter den Geröllen, welche in der Einbettungsmasse der Hölzer am grossen versteinerten Wald vorkommen, das auf Taf. VIII, Fig. 1 abgebildete Stück fand, welches so sehr den Charakter eines durch die Wüstensonne gesprengten Kiesels hat, dass ich an der Homologie beider Erscheinungen nicht zweifele.

Ein zweites Taf. VIII, Fig. 4 abgebildetes Stück aus dem Dj. Achmar zeigt ein Holzfragment mit scharfen Kanten, eingebettet in Sand-

1) Neues Jahrbuch f. Min. 1836, p. 691.

Digitized by Google

stein, und ich glaube auch dieses für einen Beweis ansprechen zu dürfen, dass während der Bildung des Dj.-el-Achmar daselbst schon Wüstenklima herrschte.

Wenn es somit wahrscheinlich gemacht werden kann, dass die Bildung der Sandsteine des Dj.-el-Achmar, und die Einbettung der versteinerten Hölzer ein gleichzeitiger Vorgang war, so müssen wir jetzt untersuchen, welchen Einfluss Geysirquellen auf benachbarte Baumstämme ausüben. Beobachtungen darüber hat O. Kuntze[1]) gemacht: »Als ich im U. St. National-Park am Boiling-Lake-Geysir war, sah ich in nächster Nähe den Wald zerstört und zwar auf höchst eigenthümliche Weise. Die Bäume, wo das heisse Geysirwasser hingelaufen war, hatten Blätter, Rinde, viele Äste verloren, sowie eine weisse Farbe und zum Theil ein weiches Äussere erhalten, die meisten Bäume standen noch aufrecht, viele waren umgefallen. Die umgefallenen waren zuweilen innen verrottet, sonst aber zeigten sie gleich den stehenden abgestorbenen Bäumen genau dieselbe Erscheinung wie jene Hölzer, welche von den Besuchern zuweilen in die Geysirbassins geworfen wurden, nachdem sie zur Messung der Bassintiefe benutzt waren, d. h. sie waren von kieselhaltigem Wasser mit Kieselsäurehydrat imprägniert, weiss und weich geworden. Doch war der Unterschied bemerkbar, dass die Kieselsäure in dem im Wasser liegenden Holz nicht hart geworden, sondern weich geblieben war, während an den Bäumen in der Luft die Erhärtung des kieselhaltigen Holzes von Aussen nach Innen zu progressiv stattfand. Manche Bäume waren noch weich und zeigten noch Holzfasern, andere waren härter und die verweste Holzfaser war durch Kieseleinlagerung von gleicher Structur ersetzt..... Die Entstehung der verkieselten Bäume erklärt sich gemäss meinen Beobachtungen auf folgende Weise: Das kieselhaltige heisse Wasser gelangt zuweilen in den benachbarten Wald; dies geschieht z. B. dadurch, dass die Geysirs sich ihr Bassin nach und nach erhöhen und zeitweise ihr Wasser nur nach einer Seite abfliessen lassen; während dessen entwickelt sich nahe der anderen Seite der Wald. Allmählich erhöht sich auf der einen Abflussseite durch die sehr langsam stattfindende Kieselsinterung der Bassinrand und das heisse

1) Ausland 1880, p. 368.

Digitized by Google

Wasser fliesst eine lange Zeit nach einer anderen Seite ab und in den Wald. Ausser diesem Fall, welcher für die Verhältnisse am Boiling-Lake-Geysir passt, sind noch andere Fälle möglich, dass heisses Kieselwasser in den Wald gelangt. Wenn es aber geschieht, dann sterben die Bäume ab, verlieren Blätter, Rinde, viele Äste, bleiben aber aufrecht stehen. Das heisse Kieselwasser steigt capillarisch durch die Holzzellen im Baume in die Höhe, imprägniert sie und verdunstet zunächst an der Aussenseite der oberirdischen Wurzeln des Stammes. Dadurch scheidet sich die Kieselgallerte in den äusseren Schichten des Holzes zuerst ab und erhärtet nach aussen zuerst, wobei die Verwesung des Holzes mit der Erhärtung der Kieselgallerte gleichen Schritt hält, indem sie von aussen nach innen vorschreitet. Oft kommt es vor, dass die anfänglich durch die Kieselgallerte etwas weich gewordenen Baumstämme durch den Wind umfallen; dann ist meist nur der äussere Theil verkieselt und erhärtet, der innere Theil verwest nachher und wird entweder durch fremde Materie ausgefüllt oder bleibt hohl.

Die verkieselten Bäume entstehen also nie unter Wasser, sondern über dem Erdboden in situ, durch verhältnissmässig wenig, aber stetig zufliessendes kieselhaltiges Wasser von Geysirs oder heissen Quellen, welches in dem Holz capillarisch in die Höhe steigt und an der Luft allmählich verdunstet.

Das in den Firehole- und Madison-River abfliessende erkaltete kieselhaltige Wasser der Geysirs verursacht keine verkieselten Bäume, trotzdem es in den bewaldeten Sümpfen neben dem Flusse weithin reichlich weisse sinterartige Kieseldepositen ausscheidet, was man namentlich an den aufgerichteten, mit Erde behafteten Wurzeln der durch den Wind oft umgeworfenen lebenden Coniferen dort ersehen kann.«

Es sind zwar bisher keine thätigen Geysirquellen in den ägyptischen Wüsten gefunden worden, aber bemerkenswerth ist die Thatsache, dass in der Provinz Constantine die Hammâm-Meskhutin genannten 97° C. heissen Quellen sprudeln. »Neben der Cascadenbildung sind Sinterkegel häufig, welche sich um eine sprudelnde Quelle gebildet haben. Hunderte solcher, bis 10 m hoher Kalksinterhügel geben der Gegend einen sehr fremdartigen Charakter[1].«

---

1) Braun, Zeitschr. der deutsch. geol. Gesellsch. 1872, p. 34.

Hammâm-Meskhutin[1]) selbst liegt mitten in einem Gürtel heisser Quellen, welcher sich von Setif durch Constantine nach Hammâm-Berda erstreckt (vgl. auch SEDILLOT, Comptes rendus V, p. 555).

»Die heissen Quellen[2]) sind so mächtig, dass sie in jeder Minute über hunderttausend Liter kochendes Wasser liefern. Dichte Dampfwolken verrathen die zahlreichen Stellen, an denen das Mineralwasser aus einem siebförmig durchlöcherten Felsengrunde hervorsprudelt, entlang einer Erdspalte von 2 km Länge. Der sog. versteinerte Wasserfall, aus Kalksinter bestehend, ist eine in Staffeln abgetheilte Felsenbank von 20 m Höhe und der doppelten Breite. Oberhalb des versteinerten Wasserfalls erheben sich auf einem grünen Plateau über hundert 2—5 m hohe Sinterkegel, fast wie Termitenhaufen aussehend.«

Wenn hier auch nicht gerade Kieselsinter gebildet wird, so ist doch das Geysirphänomen hier direct in der Wüste beobachtet und bestätigt die Annahme SCHWEINFURTH's.

Indem wir alle diese Beobachtungen mit den Umständen vergleichen, unter denen die fossilen Hölzer der jüngeren Tertiärzeit in Ägypten vorkommen, glaube ich, dass die Ansicht SCHWEINFURTH's, wonach dieselben durch Geysirbildung entstanden seien, viel an Wahrscheinlichkeit gewinnt; und ich glaube, dass diese Annahme um so wahrscheinlicher und einwurfsfreier wird, wenn man die vorcretaceischen Hölzer des Nubischen Sandsteins als eine von jenen vollkommen verschiedene Bildung erkennt.

Wir sehen somit, dass die fossilen Hölzer in Ägypten zwei verschiedenen Erdepochen angehören und zwei verschiedenen Bildungsvorgängen ihre Entstehung verdanken; indem man zwei Erscheinungen die nichts mit einander zu thun haben, unter einem Gesichtspunkt behandelte, mussten sich Schwierigkeiten des Verständnisses ergeben, die leicht gelöst werden, wenn man das Problem zergliedert.

---

1) POUILLON BOBLAYE, l'Instit. 1838, p. 247 f.

2) E. HAECKEL, Algerische Erinnerungen. Deutsche Rundschau 1890, Nov. p. 232.

Digitized by Google

V. Die Sandwüste.

1. Bildung des Wüstensandes.

Die Litoralzone der deutschen Küsten ist mit Sand bedeckt, welcher oft in hohen Dünenzügen aufsteigend zu den charakteristischen Erscheinungen der Küstenlandschaft gehört. Aber auch ausserhalb Deutschlands beobachtet man an allen nicht felsigen Küsten mehr oder minder bedeutende Anhäufungen von reinem feinkörnigem Quarzsand. In den Kreisen der Naturforscher nicht minder wie in denen der Laien ist die dadurch hervorgerufene Ideenassociation von Meeresküste und Dünensand auch auf den Meeresgrund übertragen und der Schluss gezogen worden, dass derselbe Sand auch den Boden des Meeres bedecke. Dieser Schluss widerspricht allen Beobachtungen. Ich habe seit einer Reihe von Jahren eingehende Untersuchungen an vielen Küsten angestellt, und hunderte von Grundproben der litoralen Sedimentzone entnommen, aber bis jetzt ist mir noch nicht ein Fall bekannt geworden, dass der reine Quarzsand, welcher die Dünenzüge oder den Strandsand an einer Küste bildet, sich auch am Meeresgrunde finde.

Bekanntlich zeichnet sich der Dünensand an den Küsten durch seine Reinheit von fremden Beimengungen aus, er wird wesentlich aus weissen oder gelblichen Quarzkörnchen gebildet, zwischen denen nur selten Staub und organische Schmutztheile vertheilt sind. Im Gegensatz hierzu ist der Meeressand selbst in wenigen Meter Wassertiefe missfarbig, mit mineralischen und organischen Gemengtheilchen durchsetzt, und aus einer Wassertiefe von 20 m erhält man schon ein Sediment, dass nur zum kleineren Theil aus Sand, im übrigen aber aus Schlamm besteht.

Wenn man an einer dünenreichen Küste, so z. B. der Kurischen Nehrung, die Beschaffenheit des Sandes vom Ostseeufer aufwärts bis zum Dünenkamm aufmerksam verfolgt, so kann man sich leicht davon überzeugen, dass mit zunehmender Entfernung vom Strande auch die Reinheit des Sandes zunimmt. Wir lesen dieselbe Beobachtung bei Marcel de Serres[1]: »Am Ufer der französischen Mittelmeerküsten

1) Petermanns Mitth. V, p. 197.

Digitized by Google

findet sich eine Zone ausgeworfenen Meeressandes mit vielen Muscheln und Geröllen, daran schliesst sich eine zweite Zone feineren Sandes mit sehr wenig Muschelresten und organischen Stoffen, welcher landeinwärts immer weiter geweht wird.«

Mehrere Ursachen kommen zusammen um zu bewirken, dass der Sand unter Wasser mit Schlamm und organischen Stoffen durchsetzt ist, in der Luft aber von solchen Beimengungen gereinigt wird.

Zuerst spielt die verschiedene Dichtigkeit der beiden Medien eine beeinflussende Rolle, zweitens wird im Niveau des Wasserstandes durch die beständige Bewegung des Wassers der Sand gewaschen, und bei Ebbe findet der Wind am Ufer reingewaschenen Sand, den er weitertragen kann. Sodann ist die Bewegung der Luft im Durchschnitt eine viel stärkere als die des Wassers und endlich, als Hauptsache, ist die Bewegungsweise der Wellen von der des Windes grundverschieden. Obwohl die Wellen auf der Oberfläche des Meeresspiegels vorwärts zu schreiten scheinen, so bewegt sich doch im Grunde das Wasser nur vertical auf und nieder, und die bei der Aufwärtsbewegung suspendiert gehaltenen Schlammtheilchen werden beim Herannahen eines Wellenthales wieder dem Meeresboden genähert, und wenn der Sturm sich gelegt hat, so sind sie horizontal nur wenig fortgetragen, sinken langsam wieder zu Boden und verunreinigen wieder den Sand. Anders an der Küste oder auf dem festen Land. Die Bewegung des Windes ist eine horizontal fortschreitende, und alle vom Wind erfassten Staubtheile werden horizontal weitertransportiert. Deshalb reinigt der Wind den Sand leicht und schafft ein Sediment, das sich durch den Mangel an organischen Fremdkörpern und thonigen Verunreinigungen, mit anderen Worten, durch Reinheit und helle Farbe auszeichnet.

Die Reinheit und Staubfreiheit des Dünensandes an den Meeresküsten ist daher nicht eine Folgeerscheinung des »Meeres«, sondern der »Küste«. Der Sand am Meeresgrund ist schmutzig, mit Schlammtheilchen durchsetzt, der Sand in der Luft auf dem Festland ist rein und hellfarbig.

Indem man diese Erwägungen nicht beachtete und die thatsächlichen Beobachtungen vernachlässigte, bildete sich allmählich jenes, ich möchte sagen, verhängnissvolle Vorurtheil, dass der reine Quarzsand an der Küste eine specifische Meereserscheinung sei. Ich will

Digitized by Google

hier nicht weiter ausführen, wohin jener Irrthum auf geologischem Gebiet geführt hat, ich will nur darauf hinweisen, dass dieser Irrthum einer der Hauptbeweise war für die Hypothese, dass die Sahara ein ausgetrocknetes Meer und der Wüstensand Meeressand sei.

Als später durch kühne Reisende die Sahara nach allen Richtungen gekreuzt worden war, als man erkannte, dass der Sand in der Wüste nur begrenzte Räume bedecke, dass weite Wüstengebiete sandfrei seien, da erlitt jene Hypothese auch einen Stoss, und statt ihrer traten andere Ansichten auf.

Es war vielleicht ein Zufall, dass jetzt der Nubische Sandstein als Muttergestein allen Wüstensandes betrachtet wurde.

Als 1851 Overweg die tripolitanische Wüste geologisch untersuchte, reiste er eine lange Strecke durch ein Sandsteingebiet, und beobachtete, dass dieser Sandstein zu Wüstensand verwittere. Er schreibt[1]: »Der Landstrich zwischen W. Schiati und W. Rarbi ist ein Sandgebirge; Berge und tiefe Thäler aus losem Sand, steile Sandabhänge, scharfe Sandrücken. Nur an einer Stelle sah ich unter dem Sand den nackten mürben Sandstein anstehen; ich zweifele jedoch nicht, dass aller Sand hier an Ort und Stelle gebildet, d. h. Verwitterungsproduct eines losen Sandsteines ist.« Nach vorstehender Beschreibung könnte man allerdings mit ebenso gutem Recht die Sache umkehren, und den »mürben Sandstein« unter dem lockeren Wüstensand einfach als etwas verhärteten Wüstensand betrachten — allein ich will zugeben, dass hier wirklich Sandstein zu Wüstensand zerfällt, da ich selbst einige Wochen lang im Nubischen Sandstein gereist bin und gesehen habe, dass derselbe, wenn auch nur in geringem Masse, Sand liefern kann (s. Fig. 78).

1860 schreibt Bu Derba[2]: »Das Plateau von Tarurit ist mit Sandsteinblöcken von phantastischen Formen übersäet, den Überresten zerstörter Mamelons. Der weisse Sand dankt seine Entstehung der Zerstörung dieser Felsen.«

»Der[3]) gelbe Sandstein am Fuss der Hammada von Tripoli liefert durch seinen Zerfall einen grossen Theil des Sandes, der den Winden

1) Overweg, Zeitschr. d. deutsch. geol. Ges. 1851, p. 102.
2) Bu Derba, Zeitschr. f. allgem. Erdkunde. Berlin 1860, p. 480.
3) von Bary, Zeitschr. d. Vereins f. Erdkunde. Berlin 1876, p. 164.

Digitized by Google

preisgegeben, nur in tiefen Mulden oder hinter Höhenzügen zur Ruhe kommt.«

In diesen Fällen ist es ganz zweifellos, dass Sandstein verwitterte und dass als Denudationsresultat Wüstensand entstehen musste.

Auch ZITTEL[1]) beobachtete bei Dachel, wie Nubischer Sandstein zu Wüstensand verwittert, und sprach sich demzufolge dahin aus: »Gegen die Entstehung des Wüstensandes aus Nubischem Sandstein dürfte sich kaum ein gewichtiger Einwurf erheben.«

Wenn die ganze Sahara ausschliesslich von Nubischem Sandstein unterlagert würde, wenn kein Kalk, kein Granit in Nordafrika vorkäme, und wenn man sicher wüsste, dass der Wüstensand nicht

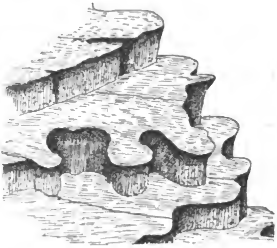


Fig. 78. Verwitternde Sandsteinfelsen am Dj. Hamâm Musa.

weither transportiert werden könne, so bliebe allerdings nur die eine Möglichkeit. Allein verschiedene Wüstenreisende erweitern schon das Ursprungsgebiet des Wüstensandes, wie ich vermuthe in der Erwägung, dass der Sand in der Wüste unverhältnissmässig grössere Räume einnimmt, als der Nubische Sandstein.

VON BARY schreibt[2]): »Im Uâdi Igargarmellen liegen auf der Südseite einer hohen Bergwand Inegeddi helle Sanddünen. Es muss Jedem auffallen, hier mitten im Gebirge plötzlich auf hohe Dünen feinsten Flugsandes zu stossen, während auf der übrigen Tasili nirgends Sandanhäufungen vorkommen. Hier kann man gewiss nicht

1) ZITTEL, Über den geologischen Bau der libyschen Wüste. Festrede, Acad. der Wissensch. zu München. 1880, p. 19.

2) VON BARY, Zeitschr. des Vereins für Erdkunde zu Berlin. 1876, p. 187.

Digitized by Google

von Zersetzung des Gesteins an Ort und Stelle sprechen, da die ganze Gegend aus demselben Sandstein besteht und wohl überall denselben Gesetzen der Verwitterung unterworfen ist.«

Wir lesen bei Lenz[1]: »Die heutige Sandbedeckung eines grossen Theiles der Sahara hat mit einem alten Meeresboden nichts zu thun; es ist dies ein durch die Atmosphärilien zerstörtes Sandstein- oder Quarzitgebirge .... Der Sand stammt aus den Flussbetten, aus denen er herausgeweht und weithin zerstreut wird.«

»Sandfelder spielen noch in der felsigen Wüste eine grosse Rolle, wo sie als Zersetzungsproduct abgetragener Granitspitzen die Basis der Thäler oft in erstaunlicher Regelmässigkeit nivellieren. Dazwischen finden sich namentlich in der Nachbarschaft amphibolischer Felsbildungen, streifenförmige Ansammlungen sehr feiner Thonlagen von gelblicher Färbung.[2]«

»Il en résulte, pour nous, la preuve la plus évidente que le vent n'a pas les effets qu'on lui suppose généralement, que les dunes ne doivent au vent que certaines formes spéciales, mais non leur production; que les dunes, près de Chadamès, sont les produits de la décomposition, de la destruction sur place de vastes plateaux ou montagnes, appartenant à la craie blanche, formés de quartzits, de gypses sableux, de dolomies quartzeuses, de gypses et de dolomie. Il est évident que cette montagne deviendra une dune; sa décomposition se fait de nos jours.«[3]

Was aber das Problem der Wüstensandbildung noch erweitert ist dies, dass der Nubische Sandstein wahrscheinlich selbst eine Wüstenbildung ist[4], dass mithin das Problem nicht im geringsten gefördert wird, wenn man die Entstehung allen Wüstensandes aus dem Nubischen Sandstein herleitet. Die Lösung wird dadurch nur hinausgeschoben. Das weitgefasste Problem lautet vielmehr: Wie und woraus entstand der Wüstensand der Gegenwart und der Wüstensandstein Nordafrikas? wo ist der Ursprung

1) O. Lenz, Timbuktu II. p. 572.

2) G. Schweinfurth, Pflanzengeogr. Skizze des gesammten Nilgebietes und der Uferländer des Rothen Meeres. Petermanns Mitth. XIV, p. 121.

3) Mission de Chadamès, p. 277.

4) G. Schweinfurth, Sur une récente exploration de l'Ouâdi Arabah. Bull. de l'Institut Egyptien. Le Caire 1888, p. 15.

Digitized by Google

zu suchen für die dort aufgehäuften lockeren und verkitteten Massen reinen Quarzsandes?

Wir haben bei der Behandlung der »braunen Rinde« gesehen, dass die Oberfläche des Nubischen Sandsteins durch eine solche Rinde verhärtet und gegen Verwitterung und Sandgebläse geschützt ist, dass nur die beschatteten Spalten und Wandflächen des Sandsteins der Verwitterung zugänglich sind. Untersuchen wir, ob es in der Wüste noch andere quarzhaltige Gesteine giebt, deren Oberfläche nicht so leicht durch eine Schutzrinde verfestigt wird und die daher den wüstenbildenden Kräften stärker unterworfen sind.

Ich will zuerst ältere Beobachtungen mittheilen, wie ich sie zu meiner Freude überall in der Literatur zerstreut fand.

EHRENBERG schreibt[1]: »Die beschwerlichsten unserer Landreisen fallen in die Gegend der Urgebirge von Nubien, wo der tiefe Sand der Thäler die Kraft der Kameele und Menschen, selbst der Eingeborenen, bis zum Tode erschöpft. Ja jene Gebirgsgegenden bilden eine vielfache grossartige Wetterfahne, wie sie vielleicht nur einmal in der Welt existiert. Alle dazu gehörigen Felsen nämlich hatten mit entschiedener Consequenz in südlicher Richtung einen, wo der Raum der Fläche es gestattete, oft lang hinlaufenden Sandanhang, von zuweilen mehreren 100 Fuss Höhe.«

Zwischen Assuan und Berenice beobachtete BARTH[2]) am 15. October 1846 bei spärlichstem Baumwuchs im Granitgebirge, dass die Granitfelsen ganz und gar verwittert waren. Ihre Oberfläche bestand aus Kiesschutt, der den Regen leicht in den Thalboden hinabführt.

Häufig beschreibt G. SCHWEINFURTH[3]) dieselbe Erscheinung: »Im Gegensatz zum Granit, der grösstentheils durch Zersetzung des Feldspathes und die bei mangelnder Homogenität der Masse äusserst wirksamen Verzerrungen in Folge gewaltiger Temperaturveränderungen leicht zu gleichförmigem Kiessand zerfällt, welcher sich alsdann später durch gegenseitige Reibung seiner Theile im Winde

1) EHRENBERG, Beitrag zur Charakteristik der nordafrikanischen Wüsten. Abh. d. Acad. d. Wissensch. math.-physik. Classe, Berlin 1827, p. 17.

2) BARTH, Zeitschr. f. allgem. Erdkunde. Berlin 1860, p. 6.

3) G. SCHWEINFURTH, Zeitschr. f. allgem. Erdkunde. Berlin 1865, p. 134. 311. 398.

Digitized by Google

immer mehr abschleift und verfeinert, zeigt der Basalt ein ganz anderes Verhalten.«

»Der Granit am Fuss des G. Feraje bildet abgerundete Blöcke, welche an der Oberfläche blätterig zersetzt sind. Fussdicke und dünnere Scherben lagen abgelöst an der Basis der Blöcke und harrten ihrer weiteren Zersetzung zu grobkiesigem Sande.«

»Der Granit in Nordafrika hat die Eigenthümlichkeit, dass er sich an seiner Oberfläche schieferartig zersetzt.«

»Die[1]) Granitgebirge der arabischen Wüste erheben sich bis zu 4000 Fuss Höhe. Diese Gesteine sind nirgends wie in anderen Ländern von einer Humusschicht bedeckt, doch darf der Geologe seine Gäa auch nicht in reiner Nacktheit sehen, denn die oberflächliche Schicht ist meist, oft ziemlich tief hinein, durch und durch zerklüftet, so dass man nicht leicht ein gutes Handstück mit allseitig frischem Bruch abschlagen kann, auch bei Besteigen eines Berges keinen sicheren Halt findet, da diese Schicht sich abbröckelt.«

Aber nicht nur in der nordafrikanischen Wüste findet diese sonderbare Lockerung des Granites statt, sondern aus verschiedenen anderen Gegenden berichtet man dasselbe.

»Der[2]) Sand, welcher bis unmittelbar an die Küste von Angra-Pequena in den Thälern zwischen den Gneissbergen, sowie weiter landeinwärts bis |Aus sich findet, an beiden Orten aber mehr eine gröbere Beschaffenheit besitzt, ist nichts anderes als das Verwitterungsproduct des Gneisses. Hitze und Wind arbeiten an dessen Zerstörung. Dünne Schalen springen zunächst vom Gneiss ab, diese zerfallen dann allmählich zuerst zu gröberem, dann zu immer feinerem Sande. In diesem lassen sich die Bestandtheile des Gneisses noch sehr gut erkennen.«

»Der Dünensand[3]) der SW.-Küste Afrikas scheint nicht sehr weit transportiert zu sein, sondern mehr sandig abgerollter Detritus des unter ihm anstehenden Gesteins, denn mitten in dem weissgelben, fast nur aus Quarzkörnern bestehenden Sande kommen einzelne Flecken von rothem oder schwarzem Sand vor. Ersterer besteht

1) KLUNZINGER, Bilder aus Oberägypten, p. 229.

2) A. SCHENK, Petermanns Mitth., Bd. 31, p. 133.

3) STAPFF, Petermanns Mitth. Bd. 33, p. 206 und Verh. des Vereins für Erdkunde. Berlin 1887, p. 52.

Digitized by Google

ganz überwiegend aus rothem Eisenkiesel, letzterer aus Magneteisensteinkörnchen von Scheibenpulvergrösse. Der schwerere Sand nimmt immer die Kämme, der leichtere die Vertiefungen der Windrippeln ein. Solche farbige Sandflecken kommen namentlich an den Küstendünen von Sandwichhafen nordwärts vor, wo aber auch eine Quarzitklippe zu Tage tritt, mit rothen Eisenkieselstreifen und Magneteisensteinkörnchen d. i. dem Material des gefärbten Sandes.... An den Kämmen mitten in den Dünen bemerkte ich einige Male glitzernde federbuschähnliche Wölkchen, und hielt sie für eine neue Form von Luftspiegelung, bis ich mitten in eine ritt und fand, dass sie aus zarten Schüppchen von Kaliglimmer bestand. In der Nähe von Pegmatithügeln auf der Namieb sieht man öfters solchen Glimmerstaub.«

Fig. 79. Sinaiwüste nahe dem Ras Muhámmed.

»Zwischen[3]) den Sockeln der Einzelberge in der Kieswüste von Walfischbay bemerkt man hier und da Gruppen ganz flacher Rundhöcker, Riffe, wohl auch einzelne Klippenzähne, oder gar nur den Schutt zerstörter Klippen, welcher so wenig verschleppt ist, dass er Umgrenzung und Natur der ehemaligen Klippen erkennen lässt. Weisse Flecken von Quarz und Feldspath, schwarze von Diabas, Hornblendegesteinen, dunklem Schiefer oder oberflächlich geschwärztem Gneiss herrührend.«

Nachdem ich mich durch eingehende Beobachtung der Sandsteinfelsen in der mittleren Sinaiwüste überzeugt hatte, dass dieselben oberflächlich nicht stark verwittern, richtete ich mein Augenmerk auf die krystallinischen Gesteine, welche in so grosser Mannigfaltigkeit und Verbreitung die südliche Sinaihalbinsel s. Fig. 79 und die Aussenkette des Arabagebirges bilden. Es fiel mir bald auf, dass alle diese Gesteine, vom dünnschieferigen Gneiss bis zum homogenen Stock-

3) Stapff, Verh. des Vereins für Erdkunde zu Berlin. 1887, p. 48.

Digitized by Google

granit oberflächlich durchaus bröckelig waren, obwohl der Feldspath geringe Spuren chemischer Zersetzung zeigte. Die Felswände ebenso wie einzelne Blöcke waren von gesunder hellrother oder grauer Farbe, und dennoch bis in mehrere Zoll Tiefe vollkommen bröckelig. So verbreitet war diese oberflächliche Lockerung, dass es mir nur selten gelang, ein Handstück dieser so frisch aussehenden Gesteine zu schlagen. Jeder Hammerschlag erzeugte ein Haufwerk von Grus. Die Quarzkörner trennten sich von den Feldspathkrystallen, diese vom Glimmer oder von der Hornblende, und ganze Berggehänge fand ich überschüttet mit diesem groben Granitgrus.

Auf Taf. III ist in Fig. 3 ein Stück dunkelrothen Granites in unzersetztem frischem Bruche dargestellt, wie er am Sinai häufig ist. Fig. 2 zeigt den zerbröckelnden Sinaigranit, der durch Insolation gelockert nur noch aus locker zusammenhängenden Quarz- bez. Feldspathkrystallen besteht, welche leicht völlig auseinanderfallen.

Taf. III, Fig. 1 zeigt die obere zerbröckelnde Hälfte eines solchen Stückes grauen Sinaigranites, welches, von einer Anzahl Sprünge durchzogen, nur noch aus locker zusammenhängenden Krystallen besteht. Die andere Hälfte des Stückes steckte im Sand, und zeigt keine derartigen Spuren der Zersetzung, ein Beweis dafür, dass diese letztere nicht durch chemische Verwitterung sondern durch die Einwirkung der Sonnenwärme entstanden ist.

Die Erscheinung ist so allgemein, dass ich mich gar nicht wunderte als ich las, dass die Beduinen Innerarabiens für diese groben Sandarten einen besonderen Namen haben. Euting[1]) schreibt, dass man in Centralarabien Raml den gelben, weissen Flugsand nennt, Baṭḥah aber den grobkörnigen Granitsand. Man sollte nun nach den Gesetzen der Schwere annehmen, dass der Baṭḥah in den Thälern, der Raml aber in den höheren Granitgebieten lagere, allein das Gegentheil ist der Fall, wie uns Lady Anne Blunt[2]) beschreibt: »The red sand of the Nefud is of different texture from the ordinary white sand of the desert, and seems to obey mechanical laws of its own. It is coarser in texture and far less volatile, and I am inclined to think, that the ordinary light wind, which vary sandy surfaces

1) Euting, Verh. des Vereins für Erdkunde zu Berlin. 1886. p. 266.
2) Lady Blunt, A Pilgrimage to Nedj. II, p. 241.

Digitized by Google

elsewhere leave it very little affected. It is remarkable that whereas the light white sand is generally found in low hollows, or on the lee side of the hills, the red sand of the Nefud has been heaped up into a lofty mass high above the higher part of the plain.«

Diese auffallende Erscheinung lässt sich nur dadurch erklären, dass wir annehmen, der Baṭḥah, der grobe Granitsand, ist das primäre, und Raml, der feine Quarzsand, das secundäre, weiter transportierte Product.

Dass diese Zersetzung des krystallinischen Gesteins keine chemische, sondern vielmehr eine mechanische ist, beweist die Beobachtung einzelner Granitblöcke, welche zum Theil in der Erde stecken. Sie sind auf der aus dem Boden ragenden Hälfte stärker zerbröckelt, als auf der im Boden verborgenen. Da wir nun gesehen haben, dass die chemische Verwitterung am stärksten im Schatten ist, und an den Orten wo die Feuchtigkeit von der Sonne schwer abgetrocknet wird, so müsste die durch chemische Verwitterung gelockerte Granitoberfläche in der Erde stecken, und die herausragende gesund sein. Da die Beobachtung das Gegentheil lehrt, so ist dies ein sicherer Beweis dafür, dass die erwähnte Zersetzung ohne chemische Action verläuft. Es ist eine allbekannte Erscheinung, dass verschieden gefärbte Substanzen verschieden grosse Mengen von Wärme absorbieren; wir wissen auch, dass verschiedene Mineralien eine verschiedene specifische Wärme haben.

»Schon[1]) im Winter betragen die Temperaturdifferenzen des Gesteins 30°, und im Sommer noch viel mehr. Betrachtet man einen Felsblock von 1 cbm, so wird dieser durch Wärmeänderung an seiner Oberfläche täglich um etwa 1 mm ausgedehnt und wieder zusammengezogen; und denkt man sich diese oscillatorische Bewegung Jahrhunderte lang fortgesetzt, so begreift man sofort, warum in der Wüste alles Gestein an seiner Oberfläche vollständig zersplittert und zerklüftet ist.«

Wenn diese Temperaturunterschiede auf homogene, gleichfarbige Gesteine einwirken, dann bilden sich, wie ich in den vorhergehenden Abschnitten beschrieben habe, peripherische oder radiale Sprünge.

---

1) JORDAN, Physische Geographie und Meteorologie der libyschen Wüste. Cassel 1876, p. 127.

Digitized by Google

Anders aber gestalten sich die Verhältnisse, wenn ein Granit diesem Temperaturwechsel unterliegt. Der Granit besteht aus miteinander verwachsenen Krystallen von weissem Quarz, rothem Feldspath, schwarzem Glimmer oder Hornblende. Diese drei Mineralien haben aber nicht nur eine verschiedene Färbung, sondern auch eine verschiedene specifische Wärme. Während ein Basaltblock oder ein Kalkfelsen in toto den Wärmeschwankungen unterworfen ist, und als Ganzes reagiert, individualisiert sich im Granit oder in anderen krystallinischen Gesteinen die Wirkung der Insolation in jedem einzelnen Mineralkrystall. Die verschiedene Farbe lässt jeden solchen eine andere Wärmemenge absorbieren als den benachbarten anders gefärbten Krystall, die verschiedene specifische Wärme kommt hinzu, um die Ausdehnungsunterschiede benachbarter Krystalle zu steigern. Das Umgekehrte vollzieht sich bei der Nacht, wenn die Gesteine ihre Wärme wieder ausstrahlen, und sich wieder zusammenziehen — man denke sich diesen Vorgang täglich wiederkehrend, man verfolge ihn durch Jahre und Jahrhunderte, und man wird nicht mehr erstaunt sein, über die Thatsachen, dass:

1) die krystallinischen Gesteine oberflächlich zerbröckeln,
2) dass ihre Wände ohne groben Schutt aus sandigen Ebenen emporsteigen,
3) dass die Beschaffenheit des Wüstensandes nach Farbe und Korngrösse differiert und häufig dem zunächst anstehenden krystallinischen Gestein entspricht,
4) dass der grobe Granitgrus Baṭḥah bis in die höchsten Berge verfolgt werden kann,
5) dass die krystallinischen Gesteine die wichtigsten Sandbildner in der Wüste sind.

Dem Auge des Reisenden, der vom Kamelrücken herab den Sand zu seinen Füssen betrachtet, scheint derselbe über weite Strecken sich in Beschaffenheit und Farbe immer gleich zu bleiben. Wenn man aber an verschiedenen Stellen Sandproben sammelt, so sieht man bei eingehender Betrachtung, dass dieselben doch oft wechseln und ihre Eigenschaften verändern.

Wer freilich, wie es ein Forscher[1]) gethan hat, um die Beschaffen-

1) Brun, Jahrbuch der k. k. geol. Reichsanstalt Wien (Mineralog. Mitth.). 1878, p. 221.

Digitized by Google

heit des Saharasandes zu bestimmen, Proben von vier verschiedenen Localitäten der nordafrikanischen Wüste mit einander mischt und von dieser Mischung eine chemische Bauschanalyse macht, der wird geneigt sein, die Verschiedenheit des Wüstensandes gering zu achten.

Auf Taf. VII sind acht verschiedene Proben Wüstensand zur Darstellung gelangt, die ich auf einer schwarz und weissen Fläche ausbreitete. Fig. 1 ist Sand aus der Kieswüste am grossen versteinerten Wald, in dem viele kleine Kiesfragmente enthalten sind; der Sand ist gelb, und daher auf der Photographie etwas dunkel ausgefallen. Fig. 2 zeigt eine Probe des scharfkantigen Sandes, welcher am Sinai (el Masraije) aus der Zerbröckelung von Granit entsteht. Man erkennt die scharfen Ecken der einzelnen Körner und kann sogar die helleren Quarze von dem dunkleren Feldspath leicht unterscheiden. Durch weitgehende Zerkleinerung entsteht daraus Fig. 6, der an dem Granitkegel Krên Utûd (südl. Sinai) etwa 100 m hoch hinaufgetrieben war und grosse Flächen dort bedeckte. Auch hier sind die helleren Quarze aus den Feldspathfragmenten leicht zu erkennen. Fig. 4 ist eine Probe des glimmerhaltigen Sandes, der auf der Leeseite einer Düne im Arabagebirge beobachtet wurde (s. Zeichnung Fig. 80). Die rundlichen Glimmerblättchen heben sich aus dem gelben Sand als helle Flecken augenfällig hervor. Gröbere Arten reinen Quarzsandes sind in Fig. 3 (nordwestlich von Abû Roâsch) und Fig. 5 (westlich von den Pyramiden gesammelt) abgebildet. Bei diesen beiden Proben sind die Quarzkörner durch den Wind ausgelesen und die andern Bestandtheile krystallinischer Gesteine entführt.

Wir lesen bei Lenz [1]: »Südlich von Igidi finden sich weite Strecken bedeckt mit einem feinen rothen Sand, dann trifft man wieder schönen gelben Quarzsand. Südlich der Sanddünen Areg el Nfech erstreckt sich eine weite, mit grossen zahlreichen Blöcken von weissem und grauem Quarz bedeckte Ebene.«

»Der Sand [2] der Ebene von Bay Hardjah (Hadhramaut) ist sehr glimmerreich, und in den Betten einiger Regenbäche findet man Stückchen von Feldspath, Quarz und Augitkörnern.«

»Bemerkenswerth [3] ist die Reinheit des Sandes (in der Igidi-

1) O. Lenz, Timbuktu. II, p. 78.
2) v. Wrede, Zeitschr. f. Erdkunde. Berlin 1872, p. 225.
3) O. Lenz, Timbuktu. II, p. 59.

Digitized by Google

region), der nicht nur sehr wenig Staub enthält, sondern fast ausschliesslich aus bis hirsekorngrossen Körnern von Quarz besteht; sieht man genauer hin, so findet man auch manches schwarze Pünktchen, kleine Tafeln oder Nadeln von Hornblende . . . . . Am folgenden Tag ändert sich nun die Landschaft in auffallender Weise, — bald finden wir Geröllstücke von Granit und Porphyr und in der Ferne erblicken wir die Berge, von denen jene stammen. Zu beiden Seiten erheben sich diese isolierten 3—400 m hohen Berge.«

Doch verfolgen wir erst noch, welche Schicksale der Granitgrus erleidet, bis er zu Quarzsand wird. Wir sahen, dass die krystallinischen Gesteine in ihre mineralischen Elemente zerfallen, und dass, um bei dem Beispiel eines normalen Granites zu bleiben, Feldspath, Quarz und Glimmer in isolierten Krystallen am Abhang einer Felswand liegen. Sobald diese Elemente von einander getrennt sind, unterliegen sie jenen Kräften, welche wir bei Beschreibung der Kieswüste kennen gelernt haben, sie werden durch Sprünge in kleinere Fragmente zerlegt und durch das Sandgebläse zerrieben.

Hierbei werden die Körner von Feldspath und Glimmer sich anders verhalten als die des Quarzes. Dieser entspricht krystallographisch nur einem oder wenigen Individuen. Der Plagioklas aber und der Glimmer baut sich auf aus vielen dünnen Lamellen, welche gegenüber der Insolation als ebenso viele Angriffspunkte wirken. Daher ist die Zersplitterung des Plagioklas und des Glimmers eine viel intensivere als die des Quarzes.

Aber nicht nur der Sonne, sondern auch dem Winde gegenüber verhalten sich die verschiedenen Gemengtheile verschieden.

Der Glimmer ist so leicht, dass ihn der leiseste Windstoss entführt, er ist ausserdem so weich, dass er leicht zerrieben wird, wenn er inmitten einer treibenden Sandwolke schwebt. Das Gleiche gilt, wenn auch in geringem Masse, von dem Feldspath. Hier kommt aber die leichte chemische Zersetzbarkeit noch hinzu. Während der Nacht, am thaufeuchten Morgen wird der durch viele Capillaren zerkleinerte und geöffnete Feldspath von der Feuchtigkeit chemisch zersetzt, während der Quarz diesem Agens gegenüber grosse Widerstandsfähigkeit besitzt.

So dürfen wir uns gar nicht wundern, wenn der Glimmer fortgeweht, und der Feldspath zu feinem Thonstaub zerrieben wird,

Digitized by Google

jenem mehlartigen Staub, der in der Wüste so häufig beobachtet wird, der die Luft beim Samum verdunkelt, der das Wasser der Uâdibäche färbt, und dann als Lehmrinde s. Taf. I, Fig. 7 in der Sohle des Thales so lange liegen bleibt, wie ihm die geringe Feuchtigkeit noch einige Plasticität verleiht, und gegen den Wind schützt.

Am 19. April 1887 ritt ich von Râs Nasesâd nördlich über die 10 km breite und 30 km lange Ebene von Burdess nach Ayin Marchâ. Das Wetter war klar und jede Bergkuppe war auf 40 und mehr Kilometer Entfernung zu erkennen. Ich sah die Denudationsreste des Nubischen Sandsteins in 3000 Fuss Höhe auf den Granit hinübergreifen, jede Bank, jede Schicht war deutlich zu unterscheiden. Da wälzte sich gegen 11 Uhr vom Norden her eine Nebelmasse heran, die ich auf kaum 1000 Fuss Höhe taxierte. Sie verhüllte zusehends einen Berg nach dem anderen, und in der Zeit von 20 Minuten befand ich mich in einer so dichten Staubatmosphäre, dass man nicht 200 Schritt weit sehen konnte. Die Luft war trocken, die Temperatur 27° C. Kurze Zeit darnach begann ein regelrechter Sandsturm; Sandwolke auf Sandwolke zog über uns weg, und nach drei Stunden war Sand und Staub vorüber, allerdings ohne dass die Luft so klar wurde wie am Morgen. So trieb dieser Sturm die beiden wichtigsten Elemente der zersetzten krystallinischen Gesteine, den Feldspathstaub und den Quarzsand, mit colossaler Geschwindigkeit dahin, zuerst den leichteren Thonstaub, dann die schwereren Quarzkörner.

Viel zersetzten und unzersetzten Feldspathstaub transportieren die Gewitterregen auch zu Thal. Wir lesen bei Ebers[1]: »Die nach einem Gewitter von den Granitbergen im Uâdi Barak herabfliessenden Wasserbäche hatten meist eine röthliche, hie und da eine entschieden rothe Farbe.« Das beobachten wir im Granitgebirge in Europa nicht, dass ein Bach roth gefärbt sei — und an Laterit ist hier nicht zu denken; es ist vielmehr der durch Insolation gelockerte rothe Feldspath, dessen Staub die Bäche röthet.

Dieser Staub ist besonders auffallend zu beobachten in den der Wüste nahen Sandgebieten und wird von vielen Reisenden nachdrücklich erwähnt. Eine übersichtliche Zusammenstellung solcher

1) Ebers, Durch Gosen zum Sinai. 1872, p. 440.

Digitized by Google

Beobachtungen giebt O. Schneider[1]): »Die Berichterstatter, welche den Chamsin etwas eingehender geschildert haben, stimmen darin überein, dass derselbe feinen Staub aufwirbelt und mit sich führt. — Wiederholt sah ich bei Ramle an Chamsintagen die Sonne nur für kurze Zeiten, oder thatsächlich von früh bis Abend gar nicht und dabei war das den ganzen Tag herrschende Dämmerlicht so schwach, dass sich mir unwillkürlich der Gedanke aufnöthigte, die in der Bibel erwähnte »ägyptische Nacht«, welche ja auch drei Tage gedauert haben soll, könne nur auf eine Reihe recht schlimmer Chamsintage zurückgeführt werden. Das bei dem Subtropenklima Ägyptens so wunderbar hochgewölbte Firmament erschien dann flach und herniedergezogen, wie unser melancholischster Regenhimmel, und der Horizont verhüllt und dicht herangerückt. Noch vollkommener aber zeigte sich die »Sättigung« der Luft mit Staub bei jenem Chamsin, dessen schlimmsten Theil ich auf der Nordhälfte des Kanals von Sues durchlebte. Von den mächtigen Baggern waren, obwohl wir in kaum zwei Meter Entfernung vorüberfuhren, nur die nächsten Balken und auch diese nur wie Schemen, unklar und ohne scharfe Umrisse sichtbar. Anderthalb Tage haben wir damals die Sonne nicht gesehen. — Diese Art der Staubführung ist dem Wüstenwinde Unterägyptens durchaus eigen und unterscheidet ihn scharf von den dort gelegentlich auftretenden Sandstürmen, deren einen ich am 14. October 1868 erlebte. Nachmittags erhob sich von ONO kommend bei ziemlich bedecktem Himmel ein heftiger Sandsturm. In grossen, oft mehr als haushohen Wolken oder Wehen fegte der Sand über den Boden der Ramleer Küstenwüste, so dass er zeitweilig die Aussicht auf die nächsten Gartenhäuser verdeckte.«

Schneider beschreibt dann weiter die electrischen Erscheinungen während eines Sandsturms im Anschluss an Rüppell und Scheuermann und betont schliesslich, dass der Sand oft in Sandhosen gewirbelt wird.

Wir sehen also sowohl den feinen Thonstaub, als den gröberen Quarzsand als charakteristische Begleiter des Wüstenwindes; dass aber auch gelegentlich der Glimmer noch zu beachten ist, fand ich

---

1) Der Chamsin und sein Einfluss auf die niedere Thierwelt. Festschrift, Verein für Erdkunde, Dresden, Sep. p. 9.

Digitized by Google

am Fusse des G. Burbâh am Nordrande des Arabagebirges. Hier wurde ein schmales Thal durch eine Anzahl Dünenkämme s. Fig. 80 abgesperrt, welche aus Quarzsand und gelbem Feldspathstaub bestanden. In der Hohlkehle auf der Leeseite der ersten Düne fand ich ein 1 Fuss breites Band von Glimmerblättchen, untermengt mit dürren Pflanzenresten, — also alle Gemengtheile des Granites an einer Düne vereinigt.

Auf Taf. VII, Fig. 4 habe ich diesen glimmerreichen Sand dargestellt. Die rundlichen weissen Flecken sind spiegelnde Glimmerblättchen.

Aus allem dem Gesagten aber geht hervor, dass von allen

Fig. 80. Dünen (Durchschnitt) am Nordende des Arabagebirges. a Streifen von Glimmersand. b Wasserlache.

quarzhaltigen Gesteinen die krystallinischen Gesteine in der Wüste am stärksten zerstört werden, viel stärker als Sandstein oder Feuerstein und Jaspis. Diese Zerstörung erfolgt ohne wesentliche Betheiligung der chemischen Verwitterung, und in der von Stürmen durchbrausten Wüste werden die Bestandtheile des zerfallenen krystallinischen Gesteins in der Weise gesondert, dass der leichtere Feldspath u. s. w. weit entführt wird und der Quarzsand schliesslich allein übrig bleibt.

Was wird aber aus diesem Feldspathstaub schliesslich? So viel ist klar, dass er nur da aufgehäuft werden kann, wo der Wind nachlässt, der ihn transportierte, oder wo er einen Boden findet, der ihn festhält. Dieser Boden kann entweder mit einer Vegetationsdecke überzogen, den Staub fangen — als Beispiele dienen die Steppen und Savannen, welche die Wüsten begleiten.

Es ist kein Zufall, dass der Boden der vegetationslosen Wüste mit Quarzsand, der Boden der grasbewachsenen Steppe mit Thonstaub bedeckt ist; es ist aber auch kein Zufall, dass die nordafrikanischen Wüsten von Thonstaubsteppen umgeben werden. Wüste und Steppe hängen genetisch zusammen nicht nur vom Gesichtspunkt der Klimatologie, sondern auch von dem der Sedimentbildung; die Steppe ist oft ein Kind der Wüste.

Digitized by Google

Nach den Untersuchungen von Buvay findet sich an der ganzen nordafrikanischen Küste ein Übergang zwischen dem cultivierten Küstenland und der Wüste, welcher als Steppe bezeichnet werden muss [1]).

Wenn aber keine Steppenzone die Wüste begrenzt, deren Vegetationsdecke den Feldspathstaub auffängt, dann wird er weiter und weiter getragen, bis er einen Boden findet, auf dem er festklebt, mag dies der durch das Salz immer feucht gehaltene Boden einer Lehmwüste (s. den betreffenden Abschnitt), oder mag es das Meer sein. Hier findet endlich aller Feldspathstaub seine Ruhe, und die Staubfälle [2]), welche von dem Seefahrer auf offenem Meer fern von der Küste beobachtet werden, die Staubnebel, welche den Horizont trüben, hängen eng zusammen mit einem Vorgang, der sich in der centralafrikanischen Wüste vollzieht, der den Wüstensand bildet, der gewaltige Granitgebirge zu flachen Hügelgruppen einebnet.

Vorstehende Beobachtungen und Studien waren bei mir durch einen Satz bei F. von Richthofen angeregt worden, welcher [3]) schreibt: »Durch die Insolation sollten zusammengesetzte Felsarten, besonders solche, bei denen hellere und dunklere Bestandtheile miteinander wechseln, stärker gelockert werden, als homogene und gleichfarbige; dunkelgefärbte mehr als helle.«

Als ich im Herbste 1888 in Schottland war und bei Dr. Murray die Untersuchungsmethoden und die Tiefseesedimente des Challenger studierte, lernte ich Herrn Professor Thoulet aus Nancy kennen, welcher zu demselben Zwecke dort weilte. Im Laufe eines Gespräches erfuhr ich, dass derselbe bei einer Untersuchung der Vogesen fast gleichzeitig mit mir (23. August 1887) zu denselben Resultaten gelangt war. Auf meine Bitte war Herr Professor Thoulet so liebenswürdig mir einen Auszug seines Tagesbuches zur Verfügung zu stellen, den ich hier folgen lasse:

»J'avais rédigé cette note dans les Vosges (Granges), en présence

---

1) Zeitschr. für Allgem. Erdkunde. Berlin 1857, p. 290.

2) Vgl. Hellmann, Monatsberichte der K. Acad. d. Wissensch. Berlin 1878 Dinklage, Ann. f. Hydr. und marit. Meteorologie 1886.

3) Führer für Forschungsreisende, p. 94.

Digitized by Google

des gigantesques éboulis de granite qu'on trouve dans cette région.

Une roche sera d'autant plus fissurée qu'elle sera plus composée d'éléments ayant entre eux de plus grandes différences de coefficient de dilatation par la chaleur.

Prendre comme exemple le granite de la Vallée de Granges (Vosges).

Plus une roche sera fissurée et plus sera abaissé le maximum d'éclatement par la gelée indiqué expérimentalement.

Eclatement de surface par l'action combinée de la gelée et du soleil. L'éclatement sera d'autant plus grand que la roche

1) sera dans un climat où ont lieu les plus grandes alternances de température et que cette roche sera exposée plus directement aux rayons du soleil c'est-à-dire faisant face au sud;
2) sera plus mauvaise conductrice;
3) sera plus compacte (non poreuse);
4) sera composée d'éléments ayant des coefficients de dilatation plus différents.

Une roche se fissurera d'autant plus que ses éléments auront des chaleurs spécifiques plus différentes. En effet, la chaleur spécifique étant la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1° la température d'une substance, pour une source de chaleur constante les éléments de la roche s'échaufferont d'une manière plus différente et nous rentrons alors dans le cas des coefficients de dilatation, aussi un élément rocheux à chaleur spécifique forte et à coefficient de dilatation faible, présentera pour la roche le minimum de danger de fissuration à la surface, et un élément à chaleur spécifique faible et à coefficient de dilatation élevé offrira le maximum de danger de fissuration. Rôle de la composition chimique de la roche; de la couleur (pouvoir absorbant).«

Ich glaube, dass diese Bemerkungen des hervorragenden Experimentalgeologen zeigen, welche Bedeutung der soeben geschilderte Vorgang der Sandbildung in der Wüste auch für andere Klimate besitzt; zu gleicher Zeit möchte ich darauf hinweisen, dass die fast gleichzeitig von Professor THOULET, unabhängig von den meinen, angestellten Beobachtungen ein Beweis für die Richtigkeit meiner hier ausgesprochenen Ansichten sein dürften.

Digitized by Google

Von den meteorologischen Kräften, welche an der Erdoberfläche Anhäufungen von Kieselsand bilden, finden wir eine ganze Anzahl auch in der Wüste thätig. Die Brandung der Meereswellen bildet Küstendünen, welche landeinwärts wanderd Wüstendünen erzeugen; die Rinnsale der Uâdi sind bedeckt mit Quarzsand, den gelegentlich rinnendes Regenwasser auswäscht und lockert, so dass der Wind ihn leicht in die Wüstenebenen hineintragen kann, Sandsteinfelsen zerfallen und erzeugen ein sandiges Verwitterungsproduct, das ebenfalls zu Wüstensand wird. Aber alles das sind locale Vorgänge, welche das allgemeine Problem der Wüstensandbildung zwar lösen helfen, aber jedoch nicht einseitig zu lösen im Stande sind.

Sicher ist es, dass in allen Theilen der Wüste, fern von der Küste, unabhängig von der Vertheilung der Uâdi und ohne Zusammenhang mit Sandsteingebirgen, Sandhügel auftreten und grosse Strecken mit Quarzsand bedeckt sind. Der Nubische Sandstein selbst ist ein Sediment, dass nur aus verkitteten Quarzsanden besteht. Die Häufigkeit solcher Sandanhäufungen gerade in der Wüste, im Gegensatz zu anderen Denudationsgebieten der Erdoberfläche, ist zu auffallend, als dass man nicht auf die Vermuthung gebracht würde, dass diese typische Wüstenerscheinung durch specifische Wüstenprocesse veranlasst worden sei. Wenn die Bildung von Dünensand eine Erscheinung wäre, die im ausschliesslich causalen Zusammenhang mit verwittertem Sandstein stände, dann müsste sich auch ein örtlicher Zusammenhang beider Thatsachen immer nachweisen lassen, wir dürften in der Wüste nur in Sandsteingebieten Sanddünen finden, wir müssten auf der ganzen Erdoberfläche Sanddünen überall da beobachten, wo Sandsteine anstehen. Das ist aber keineswegs der Fall, und statt dessen finden wir Sanddünen so ungemein häufig vergesellschaftet mit Wüstenklima, unabhängig von der geognostischen oder topographischen Beschaffenheit des Bodens.

Aus diesen leicht zu beobachteten Thatsachen schliessen wir, dass die Entstehung des Wüstensandes von specifischen Wüstenprocessen in erster Linie abhängig ist, dass Kräftewirkungen des Wüstenklimas vorliegen. Ich bin weit entfernt zu behaupten, dass die oben geschilderte Zerbröckelung krystallinischer Gesteine die einzige Quelle für die Bildung des Wüstensandes ist, landeinwärts wandernde Küstendünen liefern sicher-

Digitized by Google

lich Wüstensand, erodierende Uâdibäche bilden Sandsedimente, und ich habe ausdrücklich hervorgehoben, dass in gewissen Wüstengebieten der Sandstein zu Wüstensand zerfällt. Allein der Nubische Sandstein ist nicht das herrschende Gestein Nordafrikas. Wenn man die Übersichtskarte betrachtet, welche Gürich[1]) von der Geologie Nordafrikas giebt, so fällt die weite Verbreitung der krystallinischen Gesteine in die Augen. Ausserdem aber mag man nicht vergessen, dass die Bildung des Nubischen Sandsteins ein Problem ist, das eng zusammenhängt mit dem von der Bildung des Wüstensandes, und wenn wir uns in jene längst vergangene Zeit zurück versetzen, wo noch kein Nubischer Sandstein existierte, dann haben wir ein Nordafrika, das ausschliesslich aus krystallinischen Gesteinen gebildet wurde, und hier entsteht die Frage, woher kommt der Quarzsand?

In einem Gebiet, das nur aus Sandstein besteht, mag immerhin der Wüstensand aus demselben entstehen, aber wir befinden uns nicht mehr auf dem Boden der Thatsachen, wenn wir diese localgültige Beobachtung auf ganz Nordafrika übertragen. Kein zweiter Denudationsvorgang in den nordafrikanischen Wüsten hat die Kraft und die Bedeutung wie der eben geschilderte, und da darf es uns nicht Wunder nehmen, wenn er Denudationsproducte schafft, deren Menge und allgemeine Verbreitung uns in Erstaunen setzt.

2. Form der Dünen.

»Der Sand[2]) bildet in der Wüste niemals eine Ebene, ebenso wenig als Wasser unter dem Einfluss des Windes. Dieselbe Ursache, welche auf dem Wasser Wellen erzeugt, erzeugt solche auf dem Sande. Mitten in der Wüste, welche in ihrem festen Grunde ungefähr eben ist, scheint die Form der langgestreckten, ganz regelmässig gestalteten Wellen, d. h. der Dünen, welche quer zur herrschenden Windrichtung stehen, die Regel zu sein. Am Rande der Wüste, wo die Nachbarschaft des Meeres, oder des Culturlandes die Regelmässigkeit der atmosphärischen Einflüsse stört, finden sich unregelmässige Dünenbildungen und Wellenformen ähnlich denen des festen

1) Gürich, Petermanns Mitth. Bd. 33, Karte 13.

2) Jordan, Kölnische Zeitung 17. IV. 1874 und Jordan, Zeitschr. für Vermessungskunde. Carlsruhe 1874. III, p. 373.

Digitized by Google

Bodens. In dem Gebiet der Unregelmässigkeit fanden wir Dünen von 5—10 Wegstunden Länge, 1/4—1/2 Stunde Breite und bis zu 100 m Höhe; stets an der Westseite (Windseite) flach und convex, dagegen an der Ostseite concav und oben 30° geböscht. Oben ist ein scharfer, wie mit dem Messer geschnittener Grat, der jedoch keine gerade Linie, sondern wieder eine Wellenlinie zeigt, weil die ganze Düne auch der Länge nach Wellenform hat. Der Querabstand der einzelnen Dünen beträgt etliche Kilometer, und dazwischen findet sich häufig ein Thal mit festem Boden. Im eigentlichen Sandmeere aber finden wir eine Woche lang auch dabei Thäler aus Sand bestehend.«

Diese Schilderung von JORDAN ergänzt ZITTELS[1]) Bericht: »Bei 25° 11′ NBr. und 45° 20′ OL. von Ferro verwandelt sich die libysche Wüste in ein einziges undurchdringbares Sandmeer. Soweit das Auge reicht, folgt Dünenkette auf Dünenkette, alle entweder von N nach S, oder von NNW nach SSO streichend; die Zwischenräume sind mit Sand ausgefüllt und gleichfalls mit niedrigen Hügelreihen bedeckt. Wie ein plötzlich erstarrtes, von Stürmen aufgeregtes Meer liegt diese Sandmasse vor dem Beschauer, scheinbar fest und doch beweglich. Wenn der Wind auf dem Dünenkamm einen Schleier feinsten Sandes aufwirbelt und jeden scharfen Umriss verwischt, dann machen die lichtgelben, zuweilen 100 m hohen Gebirgszüge einen beängstigenden, geisterhaften Eindruck. Man hat das Gefühl, die ganze Sandmasse sei in Bewegung, um sich auf Einen zu wälzen, und alle Schreckensgeschichten vom Samum aus der Kinderstube drängen sich unwillkürlich auf.«

Dass die Dünenwellen eine Folge des Windes sind, darüber sind alle Beobachter einig, und nur für gewisse südafrikanische Dünen vermuthet STAPFF[2]), dass sie trocken gelegte marine Sandbänke seien.

ROLLAND[3]) schreibt: »Les éléments des dunes dans la Sahara algérienne proviennent de la désagrégation lente, mais continue, de ces terrains sous les influences atmosphériques. En l'absence d'humidité et de végétation, rien ne fixe les matériaux ainsi rendus libres

1) ZITTEL, Petermanns Mitth. Bd. 20, p. 185.
2) STAPFF, Verh. des Vereins für Erdkunde. Berlin 1887.
3) ROLLAND, Bull. Soc. de Géogr. Paris 1886, p. 213.

Digitized by Google

et meubles, lesquels sont intégralement livrés à l'action du vent; c'est en quoi le climat saharien joue un rôle décisif dans la formation des dunes. Le vent opère ensuite le tirage et le classement des éléments désagrégés; il roule les grains de quartz à la surface du désert et, à certains étroits determinés, les amoncelle à dunes: ces amoncellements de sable sont entièrement son oeuvre. Les chaines des dunes se trouvent surtout en relation avec le rélief du sol.«

Vier Ursachen sind es, welche die Bildung der Dünen bedingen: die Configuration des Bodens, die Kraft und Richtung des Windes und der Sandgehalt des Windes; und wenn bei einer gewissen constanten Grösse dieser vier Factoren die Dünen gebildet worden sind, so werden sie ihre Form so lange behalten, als diese Factoren constant bleiben.

»Die Empfindlichkeit des sandführenden Windes, schreibt EHRENBERG[1]), gegen jeden geringen Widerstand spricht sich überall aufs Deutlichste aus. Eine kleine, holzige, den Windzug störende Pflanze reicht hin um zu bewirken, dass in ihrer Nähe sich ein grosser Sandwall bildet. — Überall wo eine schroffe felsige Fläche dem Windzug entgegensteht, findet man vor dieser einen sie zuweilen an Grösse fast erreichenden Sandwall, welcher durch einen sich nie ausfüllenden Zwischenraum getrennt ist. Ferner überall, wo eine sanft aufsteigende Fläche dem herrschenden Windzug entgegensteht, und mit einer auf der anderen Seite wieder ablaufenden Fläche einen Gebirgskamm bildet, schlägt sich der Sand auf der dem Wind entgegengesetzten niederen Fläche, wegen Mischung bewegter und unbewegter Luft in um so grösserer Menge nieder.«

Sobald durch ein solches Hinderniss eine Dünenwelle gebildet ist, wirkt diese wieder als Sandfänger für den neu herbeigetragenen Sand, und so reiht sich Dünenzug an Dünenzug an, um endlich ein mit parallelen Dünen bedecktes Sandmeer zu bilden.

Der schöne Vergleich JORDAN's von Meer und Sandwüste lässt sich noch insofern erweitern, dass man die Höhe der Dünenwellen als von der Stärke des Windes abhängig betrachtet. Gerade wie ein schwacher Wind die vorher glatte Oberfläche des Meeres nur

---

1) EHRENBERG, Beitrag zur Charakteristik der nordafric. Wüsten. Acad. d. Wissensch. Berlin 1827. Sep. p. 17.

Digitized by Google

kräuselt und mit niedrigen Rippen bedeckt, so erzeugt ein schwacher Wind auf den Sandfeldern der Wüste kleine Miniaturdünen, die sogenannten Rippelmarken s. Fig. 81. Systeme dieser, dem Geologen wohlbekannten Rippen bedecken nach einem Wind alle Sandflächen in derselben Weise, wie sich diese Rippelmarken unter Wasser am Strande des Meeres im sandigen Sedimente bilden.

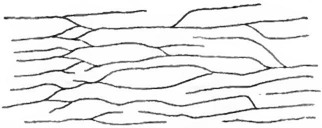


Fig. 81. Äolische Rippelmarken im groben Wüstensand bei el Golea.

Wie nur auf offener See der Sturm jene ungeheueren Wellen erzeugen kann, so finden wir die grössten und höchsten regelmässigen Dünen in den centralen Gebieten der Sahara, und nur local beobachtet man in den Randgebieten höhere Dünenberge (die Küstendünen sind keine Wüstenbildung, selbst wenn sie an einer Wüstenküste auftreten.) Vogel[1]) beschreibt einen 530 engl. Fuss hohen Sandberg am Natronsee von Fessan, und in den Granitgebirgen des Arabagebirges auf der Sinaihalbinsel[2]) sah ich einen Sandberg, dessen Höhe ich auf mehr als 500 Fuss schätzte.

Über den dritten Factor der Dünenbildung, die Sandführung des Wüstenwindes, liegen ebenfalls viele Beobachtungen vor. Bei Hadj-Hadjil erlebte Rohlfs[3]) bei Sonnenuntergang einen Sandsturm, der die ganze Karawane zollhoch mit Sand bedeckte. Am anderen Tage folgten Regenstürme. Zittel[4]) musste nach einem Sandsturm sein Zelt aus einer 26 cm hohen frisch gebildeten Sandschicht ausgraben. Dass ein Wind, der solche Sandmassen zu bewegen vermag, auch die Form der Dünen verändern muss, ist leicht begreiflich. Am 28. Januar 1874 beobachtete Jordan[5]) eine Abnahme der Dünenhöhe

1) Vogel, Petermanns Mitth. 1855, p. 245.
2) S. Korallenriffe der Sinaihalbinsel, Fig. 17.
3) Rohlfs, Petermanns Erg.-Hefte. 25, p. 11.
4) Zittel, Zeitschrift des Vereins für Erdkunde zu München. 1875, p. 258.
5) Jordan, Physik. Geogr. und Meteorologie der lib. Wüste. 1876, p. 206.

Digitized by Google

von 18 cm und in ein und einem halben Tag um 1 m. Während 1½ Stunden wurde am 4. März am Ostende des Bahr-bela-ma eine Düne von 20—30 m Höhe aufgeschüttet.

Während[1]) eines Sturmes am 26. Januar zeigte ein auf einer 15 m hohen Düne eingesteckter Palmstock, dass die Dünenhöhe um 5 cm abnahm, dagegen wurde am Lagerplatz eine 25 cm hohe Sandschicht aufgeworfen.

Jeder starke Wind, schreibt Jordan[2]), schiebt die Dünen durch Überwehen von Sand um vielleicht 1 m vorwärts, allerdings kann dann ein entgegengesetzter Wind dieses Resultat wieder aufheben; dass aber die Dünen auch grössere Strecken durchwandern, liess sich an manchen Merkmalen beobachten.

Bu Derba beobachtete[3]), dass am 28. August 1858 in der Wüste nördlich von Ghât 6 m hohe Dünen langsam vom Winde fortbewegt wurden.

Lenz[4]) sagt: »In Bezug auf die Veränderlichkeit und Wandelbarkeit der Dünen mag bemerkt werden, dass der ganze Complex Igidi ein permanentes Gebirge von Quarzsandketten ist, also sich im Wesentlichen nicht ändert. Innerhalb desselben aber finden jedes Jahr Änderungen in Bezug auf die Configuration der Gebirgskämme und Lage der einzelnen Ketten zu einander statt. Dass dieses so ist, bemerkte ich häufig bei unserem Führer, der manchmal die Orientierung verlor; an Stellen, wo im Jahre vorher ein Sandberg gestanden war, trat jetzt nackter Felsboden zu Tage und umgekehrt.«

Demgegenüber berichtet Zittel[5]), dass gewisse Dünen seit langer Zeit als Wegweiser dienen, besondere Namen haben und also ihre Form und Stellung nicht wesentlich geändert haben können.

Fassen wir also diese Berichte zusammen, so kommen wir zu dem Resultat, dass der Wüstensturm kleine und grosse Veränderungen an gewissen Dünen hervorruft, dass gewisse Dünen zweifellos

1) Jordan, Kölnische Zeitung, 14. April 1874.

2) Jordan, Sammlung Gem.-Wissensch. Vorträge. Virchow-Holtzendorf X, No. 218, p. 26.

3) Bu Derba, Zeitschr. f. Allg. Erdkunde zu Berlin. 1860, p. 473.

4) Lenz, Timbuktu. II, 58.

5) Zittel, Palaeontographica. XXX, p. 139.

Digitized by Google

wandern, dass aber andere seit Langem ihre Form und Lage nicht verändert haben können.

Die Form der Dünen ist gewöhnlich die langgestreckter paralleler Kämme, welche nur wenig von einer geraden Linie abweichen, und gerade die Regelmässigkeit der parallelen Dünenkämme ist es, die sowohl in der libyschen Wüste, wie in der Igidi beobachtet wird. »Die drei folgenden Tage[1]) brachten uns Sanddünen, zwischen denen eine fast geradlinige breite Strasse sich der Karawane bietet. Diese Dünen sind höchst merkwürdig, sie bestehen aus dem feinsten und reinsten Quarzsand, der für jedes Schreibzeug recht wäre; eine der bedeutendsten fand ich durch barometrische Messung 50 m hoch. Auf dem Gipfel derselben sieht man den ganzen Horizont, mit Ausnahme ferner Gebirgsketten im Westen und Osten, ebenfalls von Dünen begrenzt. Der Wind treibt natürlich mit dem feinen Sande sein ununterbrochenes Spiel. Jede Düne hat eine dem Winde zugekehrte harte (leichter zu ersteigende) Seite und eine dem Winde abgekehrte weiche Seite, in welche man bis über die Knöchel einsinkt. Beide Seiten sind durch einen scharfen, wie mit dem Messer geschnittenen Grat getrennt. Man sollte meinen, dass jeder Sturm die grössten Veränderungen hervorbringt, und doch ist dies nicht der Fall. Die Hauptformen bleiben Jahrzehnte lang bestehen, so dass sie Namen erhalten und den Beduinen als Wegweiser dienen.«

Ausser solchen Systemen langgestreckter »gerader Dünen« findet man häufig isolierte rundliche Sandhügel, deren Entstehung durch wandernde Sandwolken leicht verständlich ist. Lesen wir doch bei Duveyrier vom 28. April 1861 1,30 Nachm.: »Une immense nuage de sable, rougeâtre, semblable à l'aspect d'un vaste incendie, passe à l'Est, à fleur de terre, en s'élévant vers le ciel. Sa marche du SO à NE est rapide comme celle d'un vent violent.«

Nach Rohlfs unterscheiden die Beduinen der libyschen Wüste folgende Arten von Dünen:

1) Jordan, Badische Landeszeitung 7. Februar 1874.
2) Les Touareg du Nord p. 40.

Digitized by Google

Ramle	Sandebene	
Ssif	langgestreckte	Sandhügel.
Kelb	runde	
Kibsch	ovale	

Aber wir finden noch eine Form von Dünen, welche ziemlich weit verbreitet und local ungemein häufig erscheinen. Sie sind halbmondförmig gekrümmt und erreichen dabei sehr bedeutende Dimensionen. Das zahlreiche Auftreten so sonderbar gestalteter Sandhügel hat Anlass zu vielen Hypothesen über ihre Entstehung gegeben,

In Mittelarabien heissen diese gekrümmten Dünen

Fuldjes,

während A. von Middendorf und im Anschluss an ihn F. von Richthofen den turkestanischen Namen

Barchan

eingeführt haben. Ich schlage vor, sie den »geraden Dünen« als »Bogendünen« gegenüberzustellen.

Die andersgestalteten Dünen treten sowohl zwischen dem Tsad-See und Borkû, als in der Pampa grande von Chile, in grosser Häufigkeit auch in Innerarabien und in Turkestan auf.

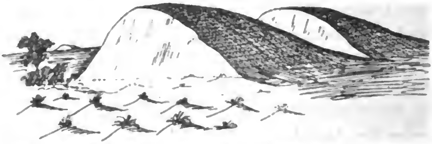


Fig. 82. Bogendünen in der Sahara nach Nachtigal, Sahara und Sudan II, p. 99.

Nachtigal[1]) beschreibt sie folgendermassen: »Schon in der Thalniederung selbst sahen wir hier zum ersten Male eigenthümlich geformte isolierte Sanddünen. Alle hatten dieselbe Form, dieselbe Orientierung und nahezu dieselbe Höhe. Sie waren selten über 15 m hoch, hatten einen sowohl in horizontaler als in verticaler Richtung convexen und nach NO gerichteten Rücken, der auf der Höhe durch

1) G. Nachtigal, Sahara und Sudan II, p. 68.

Digitized by Google

einen scharfen Rand von der steil abfallenden, im Grundriss concaven und nach SW gerichteten Seite abgesetzt war. Auf ausgedehnteren Ebenen erblickte man diese Bildungen in grosser Zahl und in den verschiedensten Abständen von einander. Es scheint unzweifelhaft, dass sie unter dem Einflusse des mit grosser Regelmässigkeit wehenden NO-Passates entstehen und wandern, und oft konnten mir später meine Gefährten, die als Wüstensöhne ein scharfes Auge für alle Unterschiede und Veränderungen des Terrains haben, an bestimmten Brunnen, einem einzelnen Baume oder anderen unbeweglichen Merkmalen in der Umgebung dieser Dünen beweisen, dass die Wanderungen derselben verhältnismässig schnell von statten gehen. Diese Schnelligkeit scheint eine verschiedene zu sein, je nachdem sie auf einer durchaus ebenen Serīr vorrücken, oder durch Unebenheiten des Terrains aufgehalten werden, und je nachdem ihr Kernpunkt oder ihre Entstehungsursache ein Baum, Gebüsch oder unbedeutenderer Gegenstand ist. Ein alter verständiger Dâza-Mann aus Borkû behauptete, als Kind eine dieser Dünen in der Nähe der Oase Jin gekannt zu haben, welche jetzt etwa 16 km von der letzteren entfernt sei, und meine arabischen Gefährten zeigten mir später auf der Rückkehr von Borkû bei dem Brunnen der kleinen Hattīja Tungur eine solche, welche einen Baum verschlungen habe, der vor sieben Jahren noch etwa 20 Schritte davon entfernt gewesen sei. Diese beweglichen Dünen werden von den dortigen Arabern Ghard plur. Ghurûd genannt.«

Während hier in Centralafrika die gekrümmten Dünen isoliert auftreten, finden wir solche in grosser Zahl im mitttleren Arabien in der Nefûd, wo sie als Fuldjes bekannt sind und vielfach beschrieben wurden.

»Unmittelbar[1]) hinter Djuf führt der Weg zunächst über hohe Sanddünen, welche die beiden Hauptorte von dem Dorfe Kara trennen, dann folgt eine Strecke Hamada und an diese schliesst sich in schroffem Übergang die Nefûd, die berüchtigte rothe Sandwüste Arabiens. Vor allem erregt die eigenthümliche, aus weiter Entfernung auffallende Färbung das höchste Interesse, es ist wirklich glänzendes Roth, das sich im Morgenthau zu Carmoisin steigert. Die

1) Lady A. Blunt, Petermanns Mitth. Bd. 27, p. 215.

Digitized by Google

einzelnen Sandkörner sind viel grösser als diejenigen, welche an anderen Stellen die Oberfläche der Wüste bedecken, und es bedarf daher einer viel grösseren Gewalt, um eine Änderung in der Formation der Oberfläche hervorzubringen, so dass Sandstürme in der Nefûd überhaupt nicht vorkommen sollen.«

Weiter berichtet Lady BLUNT: »Die eigenthümlichste Erscheinung in der Nefûd sind unzählige Löcher in verschiedener Tiefe und Grösse, von den Arabern Fuldjes genannt, welche scheinbar in einem nicht zu entziffernden Chaos über die Wüste vertheilt sind. Die Fuldjes haben die Form eines Pferdehufes und zwar fallen die Seitenwände sehr steil ab; die Zehe ist stets nach W gerichtet und hier befindet sich die tiefste Stelle der merkwürdig gestalteten Löcher, während

Fig. 83. Bogendünen (Fuldjes) in der Nefûd nach ANNE BLUNT, Pilgrimage to Nedj II, p. 242.

nach der Hacke zu die Tiefe allmählich abnimmt und schliesslich der Boden der Oberfläche der Wüste gleichkommt. Am Boden sind schmale Rinnen erkennbar, welche wie die Hornstrahlen an einem Pferdehufe sich in die Tiefe der Zehe ergiessen. Nur dort, wo der Sand eine Mächtigkeit von mindestens 80 Fuss erreicht, kommen Fuldjes vor; die kleineren haben nur eine Tiefe von 20 Fuss und eine Länge von 150 Fuss, die grössten, welche A. BLUNT gemessen hat, waren 280 Fuss tief und ½ Meile lang. Der Boden besteht bei den tiefsten Stellen gewöhnlich aus festem Gestein. Besonders eigenthümlich ist bei dieser Erscheinung, dass wie der Führer, der die Nefûd seit mehr als 40 Jahren bereist, behauptet, der Wind nie eine Änderung hervorbringen soll; in der Tiefe wachsen häufig Ghadabüsche, welche vom Sand nie verschüttet werden, ja selbst die Gebeine von Thieren und Menschen, die vor Jahren hier verdursteten, der Dung von Kamelen und Schafen, die hier weideten, sind vom Sande nicht bedeckt.« In ihrem Reisewerk[1]) hat Lady A. BLUNT Zeich-

1) Lady ANNE BLUNT, A Pilgrimage to Nedj. II, p. 242 u. 243.

Digitized by Google

nungen mitgetheilt, welche ich hier copierte und welche erstens deutlich zeigen, dass die Fuldjes s. Fig. 83 in Reihen angeordnet sind, dass zweitens ihr Querschnitt s. Fig. 84 sich nur wenig unterscheidet von dem geradliniger Dünen. Lady A. Blunt spricht sich a. a. O. Bd. I. p. 161 u. II. 242 dahin aus, dass die Fuldjes durch Wasser entstanden seien, obwohl sie auch bestimmt versichert, dass nach jedem Regen alles Wasser sofort versiegt. Ich halte diese Hypothese für schwer

Fig. 84. Durchschnitt durch Bogendünen in der Nefûd nach Anne Blunt, Pilgrimage to Nedj. II, p. 243.

beweisbar, denn die Anordnung der Fuldjes ebenso wie ihre Form entfernt sich zu sehr von allen Oberflächenformen, die wir in Erosionslandschaften zu sehen gewohnt sind.

Euting[1]), welcher ebenfalls die Nefûd bereiste, bringt eine Hypothese zur Erklärung der Fuldjes, welche vieles Bestechende hat. Wie beifolgendes hypothetische Profil Fig. 85 zeigt, geht er von der Thatsache aus, dass der Boden der Fuldjes oft aus anstehendem Sandstein besteht; dass dieselben zweitens im Längsschnitt den Charakter einer

Fig, 85. Hypothetisches Profil durch Bogendünen (Ka'arl) nach Euting, Verh. d. V. f. Erdk. Berlin 1886, p. 267.

Staffel zeigen und vermuthet, dass sie bedingt werden durch grosse Schichtenköpfe, deren Abfall dem Steilabfall der Vertiefung entspricht. Diese Anschauung leuchtet sehr ein, wenn man nur den Längsschnitt berücksichtigt; sobald man aber die horizontale Vertheilung der Fuldjes von Fig. 83 ins Auge fasst, so wird sie unhaltbar, und nur die verwickeltsten tectonischen Störungen wären im Stande, auf kurze Erstreckung eine solche Vertheilung abfallender Schichtenkopfstücke zu erzielen. Diese Theorie würde viel eher auf die parallelen Dünenzüge eine Anwendung finden können, allein da sie sich dort noch nicht

1) Euting, Verh. des Vereins für Erdkunde. Berlin 1886, p. 267.

Digitized by Google

nöthig gemacht hat, um die parallele Anordnung der Dünenzüge zu erklären, so meine ich, dass sie noch weniger naheliegend ist für die Erklärung der Fuldjes.

Ohne dass ich mich imstande fühlte, im Einzelnen die Gestalt der Fuldjes befriedigend zu erklären, will ich doch darauf hinweisen, dass sie in Reihen angeordnet sind, welche den benachbarten Dünenreihen bei Aalem und Hail parallel laufen (O.-W.), dass sie sich in einem Gebiete befinden, das mit anderem Sande bedeckt ist als der, welcher die geradlinigen Dünen bildet, dass gewöhnliche Sandstürme den Sand der Nefûd nicht zu bewegen vermögen.

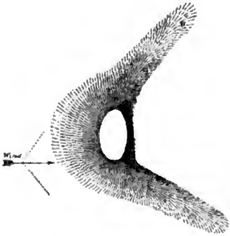


Fig. 86. Bogendünen (Barchan) in Turkestan nach v. Middendorf, Ferghana, Taf. II, Fig. 1.

Alles das macht es wahrscheinlich, dass der eigenthümliche Sand der Nefûd, der nur durch besonders heftige Stürme bewegt werden kann, sich in anderer Weise zu Dünenwellen aufthürmt als der leichtbewegliche gewöhnliche Wüstensand, und dass die Fuldjes im Grunde genommen nichts anderes sind, als gekrümmte Dünen.

A. v. Middendorf[1]) beschreibt die Bogendünen folgendermassen: »Bei dem Dorfe Patar begegnete ich Anhäufungen von Sand, welche durch ihre bizarren, auf das Schärfste und Sauberste ausgeprägten, Formen mich auf das Höchste überraschten. Die beistehende Fig. 86 giebt die Grundform wieder, welche sich bei fast allen isolierten, aber auch bei einigen zusammenfliessenden Sandbergen zeigt. Ein Vergleich mit einem Hufeisen schien mir nicht ganz passend, da das eine parallele, sogar convergierende Lage der beiden seitlichen Zungenfortsätze voraussetzen würde, dagegen ich deren Axen immer einen beispielsweise rechten Winkel — mehr oder weniger genau — zwischen sich fassen sah, d. h. sie divergieren stets. Das Bild fiele ähnlicher

1) Einblicke in das Ferghanathal. Mém. de l'Acad. Imp. St. Pétersbourg XXIX, 1881, I. p. 30 f.

aus, wollten wir die Sandhügel mit der Form des Hufknochens vom Pferde vergleichen. Eine zweite Form unterscheidet sich von der vorigen nur dadurch, dass mitten zwischen den beiden Zungen sich eine kürzere und schroff abfallende dritte Zunge gebildet hat, die nahezu die Mittelrichtung zwischen den beiden anderen einhält. Endlich fand ich eine dritte Form, bei der die eine Zunge über ¼ Werst lang ausgezogen und zwar fast doppelt so lang war als ihr Widerpart; überdies standen beide Zungen zu einander ausnahmsweise unter einem Winkel von nur 70°.«

»Allen ist gemeinsam, dass sich der Hügel an seiner abgerundeten Seite ganz gemach unter einem Winkel von etwa 15—20° erhebt, dagegen die entgegengesetzte Innenseite stets steil und geradlinig abfällt. Dieser Schüttungswinkel des Sandes betrug etwa 60°. Die Zungenfortsätze fallen dagegen für gewöhnlich von einem flachen Scheitel nach beiden Seiten sowohl, wie zu ihrer Spitze hin mit sanfter Böschung gleichmässig ab.«

Meyen[1]) schreibt, dass der Sand in der Pampa grande von Chile sich in 2000 Fuss Höhe über dem Meere zu grossen sichelförmigen Haufen schichtet, welche in ungleicher Entfernung von einander abstehen, aber zu tausenden die Ebene decken, soweit das Auge sie verfolgen kann. Die Spannung der Sicheln betrug 20—70 Schritt, die Höhe der Sandberge nur 7—15 Fuss. Auf der äusseren convexen Seite ist der Abfall gering, auf der concaven 15—80 Grade.

Über die Entstehung der Bogendünen äussert sich A. v. Middendorf l. c. p. 32 folgendermassen: »Wo sich ein Hümpel, ein Artemisien- oder Grasbüschel hervorthat, da wurde auf der Windseite eines solchen Gegenstandes aller Sand weggeblasen und dieser lagerte sich im Schutze des Hindernisses auf der Unterwindseite in Gestalt einer Sandzunge ab, deren Richtung genau der Windrichtung entsprach; die auf der Oberfläche des Sandes sich bildenden Wellenzeichnungen (Rippelmarken) stehen aber senkrecht zur Windrichtung. Indem man beide Thatsachen auf die Bogendünen anwendet, kommt man zu der Ansicht, dass die convexe Seite der Bogendüne der Himmelsrichtung entspricht, aus welcher der bildende Wind kam. Es wird solches noch dadurch bestätigt, dass diese flachaufsteigende Böschung sich

1) Reise der Prinzessin Luise. II, p. 43.

Digitized by Google

unter dem Druck des Windes fest und gut betretbar lagert, während man auf der concaven Seite knietief in den Sand versinkt. Hat sich, durch irgend ein Hinderniss, ein rundlicher Sandhügel gebildet, dann wird der darauf einwirkende Wind s. Fig. 87 nach beiden Seiten unter einem Winkel von beiläufig 135° abgelenkt und fegt in dieser Richtung die Zungenfortsätze an, deren verschiedene Ausbildung durch ungleichmässig wechselnde Stärke des Windes, durch Verschiedenheit des Sandes an Korn, Grösse und Form, an specifischem Gewicht, bedingt wird.«

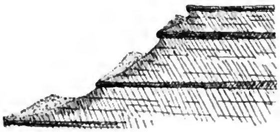


Fig. 87. Sanddünen auf felsigem Kern bei Sih'-el-Touil nach Mission de Chadamès, Fig. XVI, p. 252.

Meiner Ansicht nach erklärt diese Hypothese in völlig befriedigender Weise die sonderbare Form der Bogendünen, und spricht dafür, dass dieselben nur durch bestimmte Sand- und Windverhältnisse bedingt sind, und mit ursprünglichen felsigen Bodenformen oder Erosionserscheinungen keinen Zusammenhang haben.

Fig. 88. Sanddüne mit felsigem Kern bei Chadames nach Mission de Chadamès, Fig. XXVI, p. 285.

Ich hätte im Anschluss hieran der Ansicht zu gedenken, welche von VATONNE[1]) ausgesprochen worden ist, und welche annimmt, dass jeder Düne ein Bergzug entspricht, aus dessen Zerstörung die Düne hervorgegangen ist:

»On a dans la région de Sih-el-Touil la coupe (Fig. 88) qui assigne nettement l'âge géologique du plateau de sables et de dunes

1) Mission de Chadamès, p. 253.

Digitized by Google

qu'il supporte et donne une preuve, selon nous irrécusable, de la formation des dunes sur place par la décomposition et la désagrégation des roches de la craie blanche, grès quartzeux et gypses sableux, puis par la dissolution des éléments solubles ou la séparation des matières d'après leurs densités différentes ou la différence de grosseur des fragments.«

Die dort gegebenen trefflichen Bilder Fig. 87 u. 88 lassen meines Erachtens nur erkennen, dass sich Dünensand um einen felsigen Kern ebenso gut herumlagern kann, wie er sich auf einer ebenen Fläche auflagert. Und die Existenz eines sandfreien Hügels inmitten einer Gruppe hoher Sandberge, wie sie Fig. 20 wiedergiebt, scheint mir zu lehren, dass Felsen, ebenso wie irgend ein anderes Hinderniss, Veranlassung zu Dünenbildung geben, dass aber nicht dieser Felsen selbst den Kern der sich an ihm bildenden Düne liefert, sondern dass er nur den Sand aufhält, der sich vor oder hinter ihm dann in grösserer Masse aufschüttet.

3. Das Wandern der Dünen.

Haben wir bisher die Form und die individuellen Veränderungen der Dünen in der Wüste betrachtet, so müssen wir uns jetzt ein Urtheil darüber zu bilden suchen, ob die Dünen wandern? wo und warum dies geschieht?

Viele Reisende neigen sich der Meinung zu, dass die Formen der Dünen in der Wüste wohl durch Wind und Sturm im Kleinen verändert werden können, dass aber die Dünengebiete als solche in der Wüste localisiert sind. Rolland[1]) spricht es klar aus: »Les grandes dunes ne sont pas mobiles, sous l'action du vent qui les a formés, il y a un va-et-vint du pulvérulin sableux qui balage sans cesse le désert entre les dunes.« Doch fügt er hinzu: »Les grandes dunes marchent, mais très lentement.«

Einige Reisende erwähnen freilich Thatsachen, welche für eine sehr weite Wanderung der Dünen in der Wüste sprechen.

A. von Middendorf[2]) berichtet: »dass eine Poststrasse durch

1) Rolland, Bull. Soc. d. Géogr. Paris 1886, p. 213.

2) Mém. de l'Acad. Imp. d. St. Pétersbourg. XXIX, 1, p. 33.

den Ausläufer einer Bogendüne verlegt wurde. Dort, wo sie noch vor Kurzem durchführte, war über Nacht vom Winde ein 25 Fuss hoher und 80 Fuss breiter Sandhaufen aufgeworfen worden, so dass man gezwungen wurde, das Hinderniss unter rechtem Winkel zu umfahren.«

»Bemerkenswerth[1]) ist die Reinheit des Sandes in der Igidiregion, der fast ausschliesslich aus bis hirsekorngrossen Könern von Quarzsand besteht, mit einzelnen kleinen Hornblendekrystallfragmenten. Der Sand liegt auf einem lichtblauen Tegel auf. Die Lage der einzelnen Sanddünen ändert sich von Jahr zu Jahr.«

So erzählt EHRENBERG[2]): »Ein von Dr. VOGEL auf seiner Reise nach Murzuk in der Wüste gesammelter Staub bestand aus Quarzkörnern, die mit Rotheisenoxyd überzogen waren. Darin fanden sich Polythalamien des Mittelmeeres.« Ähnliche Sande untersuchte v. HAUER in Proben RUSSEGGER's von mehreren Punkten Nordafrikas. Dieser Sand scheint somit ins Innere gewehter (Küsten-)Dünensand zu sein.

Ähnliche Thatsachen scheint DE LAUTURE[3]) im Auge zu haben, wenn er sagt: »Si, comme il ya lieu de le croire, l'Afrique est un des plus ancients continents du monde actuel, on ne doit pas être surpris de retrouver ces dunes à une énorme distance de la côte.«

Dass man daraus nicht schliessen darf, alle Wüstendünen seien ehemalige Küstendünen, darüber habe ich schon oben gesprochen, aber immerhin ist es auffallend, wenn Forscher mit solcher Entschiedenheit für das Wandern der Dünen eintreten. In Afrika fehlen uns freilich die historisch beglaubigten Daten über ein solches Vorrücken der Sandhügel, und für gewisse Theile der Wüste wird von hervorragenden Beobachtern versichert, dass die Dünen lange Zeit constant waren, aber wir dürfen nicht generalisieren und darauf hin das Wandern anderer Dünen läugnen, von denen andere Beobachter berichten, dass sie ihre Lage im Laufe eines Jahres wesentlich verändert haben. Wir dürfen das um so weniger thun, als wir an den Küstendünen Ostpreussens ein ziemlich bedeutendes Vorrücken be-

1) LENZ, Timbuktu. II, p. 59.

2) EHRENBERG, Zeitschr. f. Allg. Erdkunde, Berlin. I, p. 246.

3) DE LAUTURE, Le Désert et le Soudan. Paris 1853, p. 32.

Digitized by Google

obachten können. Die Abhandlung Berendt's[1]) enthält eine Reihe von Thatsachen über diesen Vorgang, und die Trümmer von Kunzen, im Anfang dieses Jahrhunderts auf der Innenseite der Kurischen Nehrung gelegen, jetzt durch die wandernde Düne auf die Westseite gelangt, sind ein sprechendes Beispiel dafür, dass selbst 200 Fuss hohe Dünen wandern können.

»Der Dünensand[2]) auf Sylt fliegt ins Land hinein und die ganze Dünenkette ist in einer fortwährenden Wanderung begriffen. Im Jahre 1757 wurde die Kirche des Dorfes Rantum abgebrochen, weil die Dünenkette sie erreicht hatte. Im Jahre 1791 oder 1792 war die ganze Dünenkette über die Ruinen der Kirche weggeschritten, sie lagen vom Sande befreit am Ufer des Meeres und wurden bald verschlungen; die Stelle wo sie damals lag ist jetzt, kaum 50 Jahre später, gegen 700 Fuss vom Ufer und das Meer hat dort eine Tiefe von 12 Fuss. Die zweite Kirche von Rantum ist auch schon längst unter den Dünen verschwunden; dasselbe ist der Fall mit dem Dorfe Niblum, von dem die letzten Spuren noch am Strande liegen.«

Ich sagte oben, dass die Bildung einer Düne von vier Factoren abhängig sei: von der Configuration des Bodens, von der Richtung und Stärke des Windes und endlich von dem Sandgehalt des Windes. Nehmen wir diese vier Factoren als constant an, so ist selbstverständlich, dass die Form und Stellung der Düne ebenfalls constant ist. Solange derselbe Wind weht, solange der Wind genau so viel Sand herbeiträgt als er vom Dünenkamm abbläst, solange behält die Düne ihre Lage und Form — wie ein Wirbel im Fluss constant bleibt, solange die Bildung des Flussbettes, die Flussgeschwindigkeit, und die Wassermenge dieselbe ist.

»Wie[3]) die Schneewehen im Hochgebirge oder im hohen Norden jeden Winter wieder an ungefähr derselben Stelle so regelmässig zusammengetrieben werden, dass man Wege und Eisenbahnen durch permanente Schirme gegen sie schützen kann, so bleibt auch das Chaos der Wüstensandwehen ziemlich unverändert, solange dieselben Winde anhalten.«

---

1) Berendt, Die Geologie des Kurischen Haffs und seiner Umgebung. Schriften K. physik.-öcon. Ges. zu Königsberg, 1868, p. 216.

2) Forchhammer, Neues Jahrbuch f. Mineral. 1841, p. 27.

3) Stapff, Petermanns Mitth. Bd. 33, p. 207.

Digitized by Google

Auf diesen Schlusssatz STAPFF's aber möchte ich Gewicht legen und ihn dahin ausführen: »Solange die Bedingungen, welche eine Düne bildeten (Bodengestalt, Windrichtung, Windstärke, Sandzufuhr) dieselben bleiben, solange beharrt die Düne an ihrer Ursprungsstelle; so bald eine dieser Bedingungen sich verändert, verändert sich und wandert die Düne.«

Ich finde denselben Gedanken auch in VON BARY's Worten[1]: »Es ist höchst wahrscheinlich, dass jene Dünen, die Niederungen bedecken und rings von höherem Terrain eingeschlossen sind, unverändert ihr Volumen und ihre Stelle beibehalten, solange nicht andere meterologische Verhältnisse eintreten.« Und da wir sicher annehmen dürfen, dass in gewissen Theilen der Sahara diese »meteorologischen Verhältnisse« constant bleiben, in anderen Gebieten aber Veränderungen unterworfen sind, so darf es uns nicht Wunder nehmen, wenn ein Theil der Reisenden von constanten, ein anderer Theil von wandernden Dünen berichtet.

Fig. 89. Geschichtete Structur einer Düne.

Um den Vorgang bei der Bildung und dem Wandern einer Düne hier zu schildern, wollen wir von folgenden Voraussetzungen ausgehen: Ein Wind von constanter Richtung und Stärke transportiere periodisch bald feinen, bald gröberen Sand[2]) und die Configuration der Landschaft biete Hindernisse dar, an denen sich kleine Sandhügel ansetzen müssen:

Der Flugsand häuft sich zu einer immer höher und breiter werdenden Düne auf, welche aus abwechselnd feineren und gröberen Lagen besteht, wie dieses aus obenstehender Fig. 89 leicht ersichtlich ist.

1) VON BARY, Zeitschr. d. Vereins für Erdkunde zu Berlin 1876, p. 197.

2) Man könnte ebenso gut annehmen, dass der Wind von abwechselnder grösserer und geringerer Intensität sei, und demzufolge zu gewissen Zeiten nur feinen, zu anderen Zeiten gröberen Sand transportieren könne.

Digitized by Google

Solange mehr Sand durch den Wind herbeigetragen, als von dem Dünenkamme abgeblasen wird, solange wächst die Düne.

»Jede[1]) Düne (an der Jütländischen Küste) ist geschichtet und zwar so, dass sie eine Schichtungsfläche nach der Neigung gegen den Wind hat, also im Ganzen unter einem Winkel von 5° gegen Westen geneigt, die zweite Schichtungsfläche fällt unter einem Winkel von 30° im Ganzen gegen Osten. Diese Schichtung zeigt sich in der Abwechslung von feinen und groben Körnern, deren Absetzung durch die verschiedene Stärke des Windes bestimmt wird. Es ergiebt sich also, dass die Schichtung nicht immer ein Zeichen einer Wasserbedeckung ist, indem hier 100 Fuss über dem Niveau des Meeres Schichten gebildet werden. Nicht selten trifft man hoch in den Dünen Muschel- besonders Austernschalen, die vom Austernfresser dahin geschleppt sind.«

Sobald die herbeigetragene Sandmenge der abgetragenen gleich wird, tritt ein Stillstand im Dünenwachsthum ein, welcher unter Umständen lange andauern kann.

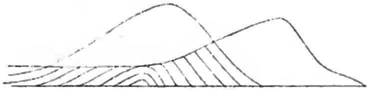


Fig. 90. Structur einer wandernden Düne.

Wenn aber jetzt einer der als constant angenommenen Factoren der Dünenbildung wechselt, wenn der Wind stärker, die Sandzufuhr geringer wird, wenn durch die Form der aufgeschütteten Dünen die Configuration des Geländes so verändert wird, dass die Bahn der Luftströmungen sich ablenken lässt, dann muss auch eine Veränderung in der Form der Düne entstehen. Nehmen wir also an, dass sich die Zufuhr von Sand zur Düne verringert, dass die Abtragung aber constant bleibt, so wandert die Düne und zwar geschieht das Wandern um so rascher, je grösser der Fehlbetrag zwischen gebrachtem und abgetragenem Sande ist.

Wir haben nun aus den Schilderungen von Zittel, Jordan, Lenz

1) Forchhammer, Neues Jahrbuch f. Min. 1841, p. 7.

Digitized by Google

oben ersehen, dass die Dünen entweder auf festem Felsen aufgeschüttet sind, so dass derselbe in den Dünenthälern zu Tage tritt, oder aber die Düne sich auf sandigem Untergrund erhebt. Nehmen wir jetzt den letzteren Fall an, und setzen wir ausserdem voraus, dass die Basis der Düne nicht mit wandert, sondern nur der hervorragende eigentliche Dünenkamm, so erhalten wir auf einem späteren Stadium umstehenden Durchschnitt s. Fig. 90.

Ich selbst hatte dieses Stadium im Vorrücken einer Düne nicht beobachtet und war um so freudiger überrascht, als ich es bei A. von Middendorf[1]) beschrieben und abgebildet fand: »Ich stiess in der Kokanwüste auf einen Sandhügel, der mit papierdünnen, aber auch bis 1/4 Zoll Dicke erreichenden Streifen in verschiedenen Abständen von einander, horizontal umbändert, gleichsam abgestuft war.

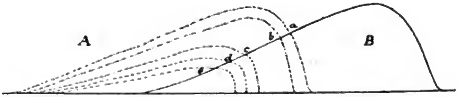


Fig. 91. Bildung einer wandernden Düne in Ferghana nach v. Middendorf.

Diese fünf Streifen ergaben sich als Lösstünche, welche in das Innere des Hügels hineinschoss. Der beistehende Holzschnitt Fig. 91 zeigt, wie ich mir diesen merkwürdigen Fall erkläre. Der Umriss des Hügels *B* zeigt den seitlichen Profildurchschnitt der Dünentypen, so wie ich ihn vorfand. Er hatte früher in *A* gestanden und war anfangs ohne seine Stelle zu ändern, im Laufe der Jahre gewachsen. Während dieses Wachsthums, welches die punktierten Linien darstellen, hatte es sich fünfmal (*a*, *b*, *c*, *d*, *e*) ereignet, dass stärkere Ablagerungen von Lössstaub aus der Atmosphäre den Hügel bedeckten, und darauf angefeuchtet, zu einem Überguss über die Sandoberfläche krustend zusammenflossen. Nachdem nun ein heftiger Sturm diese Krusten nacheinander durchbrach, den Sand in Bewegung setzte, und der Hügel von *A* nach *B* wanderte, guckten, als ich dazu kam, nur die Schichtenköpfe der früheren Lössübergüsse, Streifen darstellend, aus dem Sande des Hügels *B* hervor, unterhalb *e* aber zeigte sich der

1) Mém. de l'Acad. Impér. de St. Pétersbourg. XXIX, I, p. 91.

Digitized by Google

Streifen einige Finger breit, weil hier der gegenwärtige Umriss mit dem früheren zusammenfiel.«

Während diese erste Düne vorwärts wandert, wirkt die bestehende Düne als Damm, vor dem sich eine zweite Düne bildet. Es verläuft der Vorgang wie oben beschrieben, nur mit dem Unterschiede, dass diese zweite Düne auf einer diagonal geschichteten Sandbank aufruht, der Basis der vorhergehenden Düne.

Indem sich dieser Vorgang öfters wiederholt, indem immer neue Dünen hinter die wandernden Sandberge treten, bald ihre Basis beim Weiterwandern zurücklassen, bald dieselbe mit sich fortnehmen, entsteht allmählich eine Sandablagerung von beifolgendem Bau s. Fig. 92. Und es dürfte für den Leser eine leichte Aufgabe sein, die Geschichte beistehenden Profils nach dem Gesagten zu entziffern.

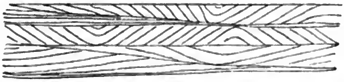


Fig. 92. Sandstein mit Diagonalschichtung entstanden durch wandernde Dünen.

Wenn wir lesen, dass zwischen den Dünenkämmen bisweilen ebene Sandflächen von über einem Kilometer Breite beobachtet werden, so macht uns diese Thatsache verständlich, dass auch dünne horizontal geschichtete Sandbänkchen zwischen den dickeren diagonal geschichteten Bänken vorkommen; und das gelegentliche Auftreten einzelner Gerölle oder kleiner Conglomeratschichten findet in dem früher Gesagten seine Erklärung.

Die so vielfach in Sandsteinen aller Formationen beobachtete »discordante Parallelstructur« oder besser »Diagonalschichtung« findet in dem eben geschilderten Vorgang ihre befriedigende Erklärung. Um eine allgemeine Formel dafür anzuwenden: entsteht Diagonalschichtung dadurch, dass ein aus concentrischen Schalen aufgebauter isolierter Hügel von Sediment seine Lage verändert und hierbei einen Theil seiner Basis am alten Orte zurücklässt. Dieser Vorgang kann sich selbstverständlich am Meeresgrunde ebenso leicht vollziehen, wie auf dem festen Lande, aber da am Boden des Meeres Sediment-

hügel von steilem Böschungswinkel nur selten beobachtet werden, da im Gegentheil die Sedimente am Meeresgrunde sich gewöhnlich über weite ebene Flächen in horizontalen Schichten ausbreiten, — da andererseits ebene Sedimentflächen in den sandbedeckten Regionen des Festlandes zu den Ausnahmen gehören, und statt dessen Dünenhügel mit einem oft sehr steilen Böschungswinkel die Regel sind, so kann sich Diagonalschichtung viel leichter auf dem Festland als unter Wasser bilden, und eine regelmässig und in grösserer Mächtigkeit diagonal geschichtete Ablagerung zeigt in diesen Eigenschaften Charaktere, welche auf eine Bildung des Festlandes hinweisen.

Fig. 93. Äolische Sandsteine im Uâdi Hascheb (südliche Sinaihalbinsel).

Ich richtete auf meiner Reise ganz besondere Aufmerksamkeit darauf, Durchschnitte durch Dünen zu sehen, aber meine Bemühungen waren vergeblich, bis ich nahe der Südspitze der Sinaihalbinsel, wenn nicht den Durchschnitt durch eine einzige Düne, so doch ein 10 Kilometer langes Profil Fig. 93 durch ein mit Flugsand erfülltes Thal studieren konnte. Das Uâdi Hascheb verläuft vom Râs Muhámmed zwischen Granitgebirgen in nördlicher Richtung und erreicht eine bedeutende Höhe über dem Meeresspiegel. Dieses Thal ist erfüllt mit weissem Flugsand, welcher wie der Schnee im Hochgebirge alle Vertiefungen und Runsen ausfüllt und sich lebhaft abhebt von den dunkleren Granitgesteinen. In alle Seitenthäler dringt die Sanddecke hinein, alle Spalten überdeckt sie und lässt sich in dieser

Ausbildung bis in eine Meereshöhe von über 220 m verfolgen. Rundgeblasene Quarzgerölle, auch Granitfragmente und Porphyrgesteine sind gelegentlich auf den Flugsand herabgefallen und markieren die Thalsenkungen, an manchen Stellen fehlen solche, an anderen sind sie, vielleicht infolge eines Gewittergusses, zahlreich zusammengetragen. Lange Zeit mag es schon her sein, dass dieses Thal von wandernden Dünen durchzogen und durch Sandstürme erfüllt wurde, denn der einst lockere Sand ist in den tieferen Lagen verkittet zu einem mässig festen Sandstein. Einer jener Gewittergüsse von eng begrenztem Verbreitungsgebiet, wie ich sie in einem früheren Abschnitte geschildert habe, war im Stande sich in diese locker verkitteten Sandmassen hineinzugraben, und ein 10 m tiefes und 10 km langes, continuirliches Profil zu entblössen. Seitdem scheint es lange Zeit hier trocken gewesen zu sein, denn an den Wänden dieser angeschnittenen Sandsteinfelsen sieht man überall die Spuren der Deflation und nirgends die der Erosion. Die Wände sind von jenen Säulengängen durchbrochen, welche wir oben kennen gelernt haben, alles ist vom Sande corrodiert und vom Winde ausgeblasen.

Da, wo man die liegenden Schichten des Sandsteins sehen kann, beobachtet man zuunterst eine Schicht grobes Uâdigerölle; dieses Conglomerat, ebenso wie die untersten Sandsteinlagen sind parallel der Thalsohle und mit derselben oft merklich geneigt. Die darüber folgenden Sandsteinschichten bestehen aus einzelnen bis 1½ m dicken Bänken, zwischen denen dünne Lagen von Uâdischotter mehrfach bemerkbar sind, ein Zeichen dafür, dass die Sandablagerung im Uâdi Hascheb gelegentlich durch einen Gewitterguss unterbrochen wurde, welcher auf dem Sand eine Schicht von Geröllen ausbreitete.

Alle die Sandsteinbänke sind von wechselnder Mächtigkeit und keilen häufig vollkommen aus; was aber an ihnen am Bemerkenswerthesten ist, das ist die typische Diagonalschichtung, welche sie alle durchgehends zeigen. Jede einzelne Bank wird aus mehr oder minder geneigten Schichten zusammengesetzt, die ihrerseits von der Begrenzungsfläche der Bank geradlinig abgeschnitten werden.

Meine erste Aufgabe war es, zu untersuchen, ob nicht diese Sandsteine unter Wasser abgelagert worden seien. Allein ich überzeugte mich leicht von dem Gegentheil. An einen Binnensee war

Digitized by Google

nicht zu denken, und gegen eine marine Bildung sprach die Beschaffenheit des Sedimentes. Ich war fünf Tage lang am Ufer des Meeres gereist, und hatte zur Genüge jenen sandigen salzgetränkten Schlamm kennen gelernt, welcher in einem, mehrere Kilometer breiten Gürtel die »Lehmwüsten« der südlichen Sinaihalbinsel bildete; ich hatte während dieser Tage auch viele Stunden im Meere Sedimentstudien gemacht und gründlich beobachtet, welche Ablagerungen an den Küsten des Râs Muhámmed gebildet werden. Keine einzige dieser Bildungen hatte eine entfernte Ähnlichkeit mit den Sandsteinen des Uâdi Hascheb.

Dagegen stimmte die Structur dieser Sandsteine so sehr mit den Beobachtungen überein, die ich dort und an anderen Orten bei sanderfüllten Wüstenthälern gemacht hatte, dass ich mich davon überzeugte, dass die Sandsteine des Uâdi Hascheb eine äolische Bildung seien.

4. Spuren im Sand.

Nachdem wir die grösseren Züge in der Physiognomie der Sandwüsten kennen gelernt haben, müssen wir noch der kleineren Oberflächenformen gedenken, die zu den weit verbreiteten Erscheinungen gehören und eine, wenn auch untergeordnete, geologische Bedeutung besitzen.

Ich habe vielfach Gelegenheit gehabt Wüstengebiete zu durchreisen, welche nahe der Küste lagen. Buchten des Rothen Meeres greifen weit in die echte Wüste hinein, und der Blick des Geologen erkennt, dass auch während der Tertiärzeit rein marine Gebilde weit hinein in die Wüste getragen wurden. Infolge dieses häufigen Ineinandergreifens der Wüste und des Meeres sehe ich mich veranlasst hier auch mancher Erscheinung zu gedenken, die eigentlich dem Meere angehört, die aber doch, eingeschaltet zwischen Wüstenerscheinungen, oft weit ab vom jetzigen Strande zur Beobachtung gelangt und demzufolge bei der Beurtheilung geologischer Thatsachen mit in Rechnung gezogen werden muss. Zu den verbreitetsten Erscheinungen gehören die von den Engländern »rippelmarks« genannten Streifen im Sand, die ich als »Rippelmarken« bezeichnen will, denn der übliche Ausdruck »Wellenspuren« enthält ein, nicht immer zutreffendes, Urtheil über die Entstehung dieser Gebilde.

Digitized by Google

Man beobachtet in der Wüste solche Rippelmarken Fig. 81 u. 94 von allen Dimensionen und von sehr verschiedenartiger Form. Bald sind sie 2 cm bald 1 m breit, bald sind sie scharfkantig, bald von rundlichem Querschnitt, bald sieht man lange parallele Linien, die sich nur selten vergabeln, bald zweigt sich alle 20 cm ein schmaler Ast ab um sich umzubiegen und dem Hauptstamm parallel zu laufen. Alle Typen sympodialer oder dichasialer Verzweigung kann man beobachten, und obwohl ich ein reiches Vergleichsmaterial mariner und äolischer Rippelmarken beobachtet habe, so ist es mir bisher nicht gelungen, einen durchgreifenden Unterschied zwischen beiden aufzufinden. Ich erwähne das, weil häufig die Anwesenheit von Rippelmarken auf Sandsteinflächen als ein Beweis für marine Bildung des Sandsteins angesehen worden ist; ein solcher Schluss ist unzuverlässig. Einigemal habe ich beobachtet, dass in der Wüste die schwereren Sandkörnchen auf dem Kamm der Rippeln, die feineren und leichteren in den Vertiefungen lagen; ob solches ebenso unter Wasser entsteht, habe ich noch nicht verfolgen können.

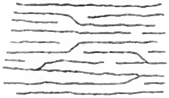


Fig. 94. Äolische Rippelmarken im feinen Wüstensand.

Fig. 95. Richtung der Strömungen bei der Bildung von Rippelmarken nach G. H. Darwin.

Diese Rippelmarken verlaufen immer senkrecht zum Wind, bezüglich zur Wellenbewegung, und bei veränderter Windrichtung wechseln sie ebenso auf dem Dünensand, wie sie ihre Richtung unter dem Wasser ändern, wenn die Wellen unter einem anderen Winkel auf die Küste stossen.

Die Bildung dieser Rippelmarken wurde von A. R. Hunt[1]), der physikalische Vorgang von G. H. Darwin[2]) genau untersucht, deren Abhandlungen ich folgende Daten entnehme: »Die Breite und Höhe der Rippeln ist gesetzmässig abhängig von der Korngrösse des Sandes

1) Proceedings of the R. Soc. London. XXXIV. April 1882, p. 1.

2) Proc. R. Soc. London, XXXVI, Nov. 1883, p. 18.

und der Stärke der Strömung. Gleichmässige Strömungen sind im Stande vorhandene Rippeln zu verlängern. Die Strömungen haben über einer gerippelten Fläche den auf Fig. 95 skizzierten Verlauf.

Nach FOREL[1]) ist die Intensität der Strömungsbewegung nebensächlich und nur die Korngrösse des Sediments von massgebendem Einfluss für die Grösse der Rippeln.

LYELL[2]) hält Rippelmarken für eine Bildung am Boden eines 6—10 Fuss tiefen Wassers, und giebt als Ausnahme 70 Fuss tiefes Wasser an.

Nach DELESSE[3]) sollen auf feinschlammigem Boden sogar in 188 m Tiefe Rippelmarken sich bilden können.

Bei allen diesen Beobachtungen wird aber viel zu wenig Gewicht darauf gelegt, dass Rippelmarken eine viel häufigere Erscheinung auf dem Festlande als wie unter Wasser sind, dass sie jedenfalls auf festländischen Sandablagerungen viel constanter beobachtet werden, während sie unter Wasser am Strande ebenso rasch verschwinden als sie gebildet wurden.

Es darf also der häufig gezogene Schluss aus dem Vorkommen von Rippelmarken an Gesteinsflächen, auf eine Strand-Bildung dieser Gesteine, nur mit grosser Reserve angewandt werden; Rippelmarken sind keine specifische Wassererscheinung.

Eine ebenfalls in der Wüste zur Beobachtung gelangende Spur rührt von Regentropfen her. Begreiflicherweise sind solche Regenspuren in der Wüste relativ selten, allein sie treten doch vielfach auf und können leicht erhalten bleiben, wenn zwischen dem Sand soviel Thonstaub enthalten ist, dass die Sandoberfläche durch Eintrocknen zusammenkrustet.

Die Mannigfaltigkeit der Formen von fallenden Tropfen sind durch A. M. WORTHINGTON[4]) beschrieben und abgebildet worden; in der Wüste sind mir zwei Haupttypen begegnet:

1) Archives des Sciences Physiques et Naturelles. Genève, 15 Juillet 1883.
2) Elements of Geology. 6. Auflage, p. 19.
3) Lithologie du fonds des Mers. 1871, p. 110.
4) Proceedings of the Royal Society. London. XXIV. Juni 1876, p. 265 f.

Digitized by Google

Wenn ein vorübergehender Platzregen auf sandigen Wüstenboden kurze Zeit herniederfällt, dann erzeugen die Regentropfen je nach ihrer Grösse verschiedene Spuren. Kleine Regentropfen, welche mit geringer Kraft auf den Sandboden gelangen, saugen sich rasch in die getroffenen Sandstellen hinein und bilden ein kleines kugeliges Knötchen feuchten Sandes, das wie ein Schrotkorn oberflächlich liegt und von den Sinaibeduinen geradezu als »Schrot« bezeichnet wird. Fallen dagegen grosse Tropfen, so bilden sie keine derartige kugelige Erhabenheit auf dem Sande, sondern sie schlagen eine halbkugelige Vertiefung in den Sand hinein, entsprechend der Form jener Abgüsse, die als versteinerte Regentropfen aus Sandstein verschiedener Perioden bekannt sind. Besonders schön aber werden diese Spuren, wenn der Regen auf eine Thonfläche herniedergeht.

Durch die Regengüsse am 4. April 1887 waren im Rinnsal des Uâdi Arabâh in der Galâlawüste grosse Mengen von Thonschlamm zusammengeschwemmt worden. Dieser Thonschlamm war dann zu einer 8 mm dicken Thonrinde zusammengetrocknet, und diese in polygonale Stücke zersprungenen Thonstücke bedeckten das Rinnsal, als am nächsten Tag ein kurzer Platzregen dort herniederging. Hierbei schlug jeder Tropfen ein so regelmässiges halbkugeliges Loch in den Thon, dass es aussah als ob er vielfach angebohrt sei.

Ein Stück dieses verhärteten Thonschlammes aus der Sohle der Uâdi Arabâh ist Taf. I, Fig. 7 dargestellt. Es ist bedeckt mit kleineren und grösseren runden Vertiefungen, welche von einem erhöhten gekerbten Rande umgeben sind.

Auch Organismen hinterlassen mancherlei Spuren, die in sehr grosser Häufigkeit in der Wüste beobachtet werden. Wenn man öde Sandflächen durchreitet, und keine andere Erscheinung das Auge zum Beobachten, den Sinn zum Nachdenken anregt, dann verfolgt man vom Kamelrücken herab mit Interesse die mannigfaltigen Spuren organischen Lebens, welche dem Sande eingedrückt sind und aus denen der Kenner manch' interessante Thatsache zu erschliessen vermag. Die Beduinen können stundenlang disputieren über die

Digitized by Google

Merkmale der Spuren, die vorausgehende Karawanen hinterlassen haben: die Zahl der Kamele, die Belastung derselben, ja sogar den Stamm dem sie angehören, Art und Ziel der Reise, Alles kann der geübte Blick aus den Spuren erkennen.

Hier sieht man die Spur einer Gazelle, welche in 3 m langen Sätzen den Karawanenpfad gekreuzt hat, dort ermahnt die Schlangenlinie, welche eine Sandviper hinterlassen hat, den Beduinen zur Aufmerksamkeit. Springmäuse, Vögel, Eidechsen, Käfer, alles hat seine charakteristische Spur, und wenn man des Morgens beim Erwachen Lederzeug angefressen, Nahrungsmittel gestohlen findet, so verräth die Spur der Hyänen oder der Fenneks und Schakale, welcher Art die Diebe waren.

Noch mannigfaltiger aber werden die Spuren, wenn man sich dem die Wüste bespülenden Meere nähert. Krabben und Einsiedlerkrebse wandern kilometerweit landeinwärts und hinterlassen dabei ihre Spur. Meeres- und Sumpfvögel gehen noch weiter in die Wüste hinein und stundenweit vom Strande kann man die grossen Zehen- und Schwimmfusseindrücke beobachten; mitgeschleppte Fischknochen kommen ebenfalls vor.

Über eine besonders interessante Spur berichtet von Bary[1]: »Am Rande des Uâdi Minhero, wo das Flussbett felsig war und grosse Tümpel enthielt, fanden sich zahlreiche Fussspuren von Krokodilen, die im Schlamm so genau abgedrückt waren, dass man selbst den Schuppenpanzer der Sohle erkennen konnte. Der kleine Vorderfuss lässt eine fast sternförmige Figur zurück, während die des Hinterfusses der Fussspur eines Kindes nicht unähnlich sieht. An den drei äusseren Zehen beider Füsse fehlen die Krallen.«

Bekanntlich hat noch keines Reisenden Auge lebende Krokodile in der Wüste gesehen, allein diese Beobachtung von Bary's beweist ihr Vorkommen ebenso sicher, wie das Auftreten von Chirotheriumfährten im bunten Sandstein uns von ausgestorbenen Thieren berichtet, deren Skelette noch unbekannt sind.

Endlich möchte ich noch der Medusenabdrücke gedenken, die ich zu tausenden am Strande des Rothen Meeres in nächster Nähe der Wüste beobachtete. Durch einen Sturm war Aurelia aurita in

1) Zeitschrift des Vereins für Erdkunde zu Berlin. 1876, p. 191.

Digitized by Google

ganz unglaublichen Mengen an den Strand geworfen worden. Die intensive Wüstensonne hatte rasch den von der Hochfluth bespülten Küstensaum getrocknet und auch die Gallertmasse der Medusen in ein dünnes Häutchen verwandelt, welches die von dem jetzt vertrockneten Medusenkörper abgegossene Form in allen ihren Feinheiten überzog. Tausende kleiner Einsiedlerkrebse waren dem Meere entstiegen und verzehrten alle die Medusenreste, welche noch nicht eingetrocknet waren, nur die ganz getrockneten liessen sie unberührt, und während sie mit ihren kleinen Beinchen im halbfesten Sand umherspazierten, bedeckten sie denselben mit unzähligen kleinen Löchern, die bei einem eventuellen Abguss der Sandoberfläche als Zäpfchen auf derselben erscheinen würden. Wenn das Meerwasser die mit Medusen bedeckte Sandfläche wieder erreichte, dann würden die Spuren gewiss allesammt wieder zerstört, die Medusengallerte aufgelöst, die Spur verwischt; wenn aber bei Landwind Dünensand hineingeweht werden würde, dann wären alle Bedingungen gegeben, um in das so entstehende Gestein wohlerhaltene Medusenabdrücke einzuschliessen.

Schon VOIGT[1]) macht bei Beschreibung der Fährten im Buntsandstein darauf aufmerksam, dass es wahrscheinlicher ist, »diese Fährten seien zuerst durch einen trockenen Flugsand überdeckt, und nicht durch sandhaltige Gewässer überschwemmt worden, denn letztere hätten wohl schnell die Schärfe der Ränder verwaschen und die Abdrücke undeutlich gemacht.«

5. Äolische Oolithgesteine.

Als ich 4 Kilometer vom Strande des Rothen Meeres entfernt im Uâdi Dehēēse einen Sand antraf, der zum Theil aus kleinen Oolithkörnern bestand, die mit Wüstensand gemischt die Gehänge der Thalniederung bedeckten, da war meine erste Vermuthung, dass ein durch Verwitterung zerfallener oolithischer Kalkstein diese Oolithkörner geliefert habe. Allein ich überzeugte mich bald, dass das nicht der Fall war, denn nirgends fand ich ein oolithhaltendes Gestein, und

1) Neues Jahrbuch f. Mineral. 1836, p. 174.

Digitized by Google

beobachtete vielmehr, dass nach dem Meere zu die Oolithe an Zahl zunahmen, bis ich endlich hart am Strand eine Düne von etwa 1 m Höhe fand, die ganz aus gelblichen Oolithkörnern bestand[1]). Auf Taf. VII, Fig. 7 ist Oolithsand von der Mündung der Uâdi Dehēēse dargestellt. Im Jahre 1888 studierte ich mehrere Tage lang die Rhede von Sues und sah zu meiner Überraschung, dass fast die ganze bei Ebbe entblöste, mehrere Kilometer breite Fläche aus Oolithsand besteht, der an manchen Bänken mit vortrefflicher Schichtung 60 cm tief aufgeschlossen ist. Ich überzeugte mich, dass die ganze Rhede von Sues ein grosses recentes Oolithlager sei.

Genau wie an der Mündung des Uâdi Dehēēse wird bei Ebbe ein grosser Theil dieses Oolithlagers trocken gelegt und der Wind weht leicht die kleinen Oolithkörner landeinwärts. Ich glaube, dass diese Oolithkörner viel weiter landein getrieben werden können, als ich am U. Dehēēse beobachten konnte, und dass sie unter günstigen Umständen einen grossen Procentsatz eines echten festländischen Wüstengesteins bilden können.

Diese Thatsache der Verschleppung eines im Meere entstandenen Sediments mitten hinein in festländisch entstandene Bildungen schien mir bedeutungsvoll genug, um sie in einem gesonderten Abschnitt zu behandeln.

Welch' weite Verbreitung solche äolisch aufbereitete, aber marin entstandene Oolithgesteine gewinnen können, darüber berichtet uns L. AGASSIZ[2]): »Double-headet shot key is a long crescent-shaped ridge of rounded knolls, not unlike, »roches moutonnées«, at intervals interrupted by breaks, so that the whole looks like a dismantled wall, broken down here and there to the water's edge. The whole ridge is composed of the finest oolithes, pretty regularly stratified, but here and there like torrential deposits (ich glaube es handelt sich um Diagonalschichtung); the stratification is more distinctly visible where the rocks have been weathered at the surface into those rugged and furrowed slopes familiarly known as »karren« in Switzerland. It is plain that we have here the same formation as on Salt Key,

1) Vgl. Korallenriffe der Sinaihalbinsel, p. 482. Diese Abhandl. XIV, Nr. X.
2) Bull. Mus. Comp. Zool. Cambridge. Nr. 13, 1869, p. 373.

Digitized by Google

only older, with more thoroughly cemented materials. The uniformity of the minute oolithes leaves no doubt that the sand must have been blown up by the wind and accumulated in the form of high dunes before it became consolidated.... The rock is very hard, ringing under the hammer, and reminds one of the bald summits of the Jura, such as Tête de Rang, near La-Chaux-de-Fonds. It is evident, that what is beginning on Salt Key has here been not only completed, but is undergoing extensive disintegration in Double-headed Shot Key, both by the action of atmospheric agents over the surface and by the action of tides and winds against the base of the key. —

»The stratification of the mainmass of these keys is very peculiar. Though evidently the result of an accumulation of oolithes thrown up by high waves, the beds are pretty regular in themselves, but slant in every direction towards the sea, showing, that they were deposited under the action of winds blowing at different times from every quarter. It is further noteworthy, that, while the thicker layers consist of oolithes readily distinguishable to the naked eye, there are at intervals thin layers of very hard, compact limestone, alternating with the oolithic strata, which have no doubt been formed in the same manner as the coating of the pot-holes.«

VI. Die Lehmwüste und das Wüstensalz.

Zu den Beweisen für die Existenz eines diluvialen Saharameeres wurde das Salz gerechnet, welches in der Wüste sich findet, und weite Strecken überzieht. Dass salzlose Regionen ebenso weit verbreitet sind, das wurde übersehen, und so blieb die irrige Meinung.

Ich traf im Uâdi Arabâh am Fusse der nördlichen Galâla eine Karawane, welche mehrere Tage weit geritten war, um dort Salz zu graben, und aus der mittleren Sahara wird uns dasselbe berichtet. Um so salzreicher sind die den Küsten nahe gelegenen Randgebiete, und hier ist die Existenz des Salzes leicht verständlich. Aber nicht so sehr die sandigen Wüstengebiete, als vielmehr die lehmbedeckten Niederungen sind durch ihren Salzreichthum ausgezeichnet.

»Der[1]) Schott Melrir ist von einer so weissen und reinen Salz-

1) BUVRY, Zeitschr. f. Allg. Erdkunde. Berlin 1858, p. 226.

Digitized by Google

kruste überdeckt, dass er täuschend einem gefrorenen See gleicht. Die Berge des Kutiat Gartufa an seinem Rande enthalten Gyps und Landschnecken, aber keine Spur von Meeresmuscheln, so dass die Annahme, welche in ihm eine Meeresbucht findet, durchaus unrichtig ist.«

Abu el-Hadjadj[1]) berichtet: »Son voyage le porta à la saline qui se trouve au environs de Tôzeur. C'est une des merveilles du monde dont les historiens ont oublié de parler. La surface de cette saline a plusieurs milles d'étendue: on dirait du métal fondu ou du marbre poli. L'oeil trompé croit y voir une admirable transparence: on croit avoir devant soi un étang dont l'eau serait gelée. L'heure de la prière étant venue pendant que la caravane traversait le lac, on y fit la prière comme sur un tapis de camphre ou de cristal. Les pas et les traces des voyageurs durant cette marche s'étant succédé les uns aux autres jusque vers la moitié de la journée, il en résulta qu'une portion de la route, d'une étendue de près de cent coudées, vient à se défoncer. Toutes les personnes de la caravane qui se trouvaient attardées y furent englouties. J'ai constaté par moi-même, ajoute El-Tidjani, que si un homme appuyait le bout de sa lance à terre, cette lance s'y enfonçait tout entière, et que s'il avait le moyen de la pousser davantage, elle s'enfonçait plus avant encore; dès qu'il la retirait, le sol redeviendrait ce qu'il était auparavant, sans garder aucune trace.« Am 6. März 1857 passierte die Karawane eine Sebcha: »Aux vases mélangées de sel que nous avons traversées succède bientôt une croûte saline de plus en plus épaisse, dure et transparente comme du verre de bouteille et résonnant à certains endroits sous les pieds de nos montures comme le sol de la solfatara de Naples. Un puits béant, dont l'ouverture montre une eau verte et profonde, nous permet de nous rendre compte de ce singulier terrain: la crôute sur laquelle nous cheminons n'a qu'une épaisseur de quelques pouces et recouvre un abîme que nous essayons en vain de sonder. Un sac à balles qui nous sert de sonde disparaît avec toutes les cordes que nous ajoutons bout à bout sans que nous trouvions le fond. Couché à plat ventre

1) Capt. ROUDAIRE, La Mission des Chotts. Rapport. Paris 1877, p. 38 u. 40.

Digitized by Google

sur le bord de la crevasse, je puise un peu d'eau pour la goûter: elle me paraît plus amère encore que celle de l'océan.«

»Jenseits[1]) der schwarzen Berge bis nach Murzuk ist der Boden überall mit einer Salzkruste überzogen.«

»Der[2]) Weg von Ghât nach dem Kokumen führt über eine weite Ebene, deren Lehmboden von einem regelmässigen Netz von Rissen durchzogen ist, worin sich stets die Form des Pentagons wiederholt. Diese durch Austrocknung entstandenen Figuren findet man sehr häufig in der Sahara, namentlich auf der Hamáda-el-homra, deren horizontale Flächen für die Bildung dieser Figuren besonders günstig sind.«

Andere Berichte wurden in dem Abschnitt »Charaktere der Wüsten« schon wiedergegeben.

Ich hatte auf meiner Reise durch die Sinaihalbinsel oft Gelegenheit, Sebcha und Salzthonwüsten zu passieren, jene in jüngerer Zeit vom Meere entblössten Flächen, welche so deutliche Spuren alten Meeresgrundes zeigen. Eine kleine Art von Cerithium fand ich dort in solchen Mengen auf dem Wüstenboden, dass die auf Taf. VII, Fig. 8 photographisch wiedergegebene Bodenprobe nicht etwa einen künstlich zusammengelesenen, sondern den wirklichen Habitus dieses Wüstenbodens wiedergiebt; er war thatsächlich mit Schnecken übersäet, und zwar in mehreren Kilometer Abstand vom Meeresstrande am Râs Sibylle.

Bei Thau oder Regen verwandelt sich die Sebcha in eine knetbare Thonmasse infolge des starken Salzgehaltes, bei trockenem Wetter trocknet die oberste Rinde 2—3 cm tief ein, es bilden sich jene vielfach erwähnten polygonalen Risse und der Boden der Lehmwüste erscheint wie parkettiert. Trocknet die Sonne noch länger, dann krümmen sich diese polygonalen Lehmplatten, die Lehmwüste erscheint wie mit Wellen bedeckt, aber in einiger Bodentiefe findet man stets die salzfeuchte Lehmmasse.

Ausgezeichnet gut drücken sich in dem halbtrockenen Sebchaboden die Fussspuren ein.

Die Regel ist, dass das Salz am reichsten in den Lehmwüsten

1) E. Vogel, Petermanns Mitth. Bd. 1, p. 245.

2) von Bary, Zeitschr. des Vereins f. Erdkunde. Berlin 1876, p 175.

Digitized by Google

ist, und das gemeinsame Auftreten von Thon und Salz wird uns leicht verständlich, wenn wir beobachten, welches Sediment ein Meer am Rande der Wüste bei negativer Strandverschiebung zu Tage bringt.

An den Küsten des Rothen Meeres bin ich tagelang über Wüstenboden gereist, der durch seinen Reichthum an Litoralfossilien sich als jung entblösster Meeresboden kennzeichnete, auf dem Cerithium zu Millionen herumlagen, und weit landeinwärts traf ich denselben Salzthon wieder (s. die geol. Karte zu meiner Abhandlung über die Korallenriffe der Sinaihalbinsel). Alle Erscheinungen, welche von den Sebcha oder Schottflächen beschrieben werden, der breiige Boden, der den Fuss ausgleiten macht, die in polygonale Felder eingetrocknete Rinde, der Salz- und Gypsreichthum, war über weite Strecken zu beobachten. Und so erscheint es mir zweifellos, dass ein Theil der Lehmwüsten, die der heutigen Küste nahe liegen, weiter nichts ist, als eingetrockneter Meeresboden.

Schwieriger ist es aber, das Auftreten von salzigen Lehmwüsten im Innern der Sahara und in den Oasen der libyschen Wüste zu erklären.

Jeder, der eine Wüstenreise gemacht hat, wird sich mit Unbehagen des salzigen Wassers erinnern, das er wochenlang trinken muss, und an das man sich allmählich so gewöhnt, dass der erste Schluck Nilwasser gar nicht wie Wasser, sondern wie ein ganz besonderes Getränk schmeckt. Selbst solches Wüstenwasser, das der Zunge des Reisenden salzfrei erscheint, giebt mit Silbernitrat einen dicken Niederschlag. Ich fand im Uâdi Tagibe ein kleines Bächlein von so salzigem Wasser, dass sogar die Kamele es verschmähten, und meine Beduinen erzählten, dass nur ein Beduine von dem verachteten Gebelieh-Stamme solches Wasser trinken könne.

»L'eau[1]) de la plupart des puits creusés dans les terrains argilo-calcaires et gypseux du Sahara, qu'elle soit jaillante on fournie par l'infiltration du sol, contient du sel marin, du chlorure de magnesium, dans d'assez grandes proportions pour être désagréable au goût.«

»Alle[2]) Seen der Ammonsoase sind ohne Fische, weil das Wasser zu salzig ist, doch entbehren sie nicht jeden Lebens.«

---

1) Cosson, Regne végétale en Algérie. 1879, p. 15.
2) Rohlfs, Von Tripolis nach Alexandrien. II, p. 85.

Digitized by Google

Eine Analyse des Wassers des Ued Biskra ergab nach Dubocq:[1])

Wasser und organische Theile	997,764
Kochsalz	0,878
Bittersalz	0,474
Schwefelsaure Soda	0,280
Schwefelsaurer Kalk	0,448
Kohlensaurer Kalk	0,156
	1000,000

also so ziemlich alle wesentlichen Bestandtheile des Meerwassers.

Wir müssen uns erinnern, dass die Sahara zum Theil aus Gesteinen besteht, welche zweifellos marinen Ursprungs sind; und wenn wir auch die fossilleeren Sandsteine ausschalten, so bleiben noch gewaltige Flächen Nordafrikas mit echten marinen Sedimenten bedeckt. Die jüngsten Sedimente, die man in ausgedehnterer Verbreitung trifft, gehören dem Miocän an, also seit dieser Zeit ist Nordafrika vom Wasser des Meeres entblösst, seit dieser Zeit ist es Wüste gewesen.

Wüste aber ist gleichbedeutend mit Regenarmuth. Jedes marine Gestein enthält grosse Mengen Meeressalz in seinen Poren, und wie wir durch die Untersuchungen von Huyssen[2]) wissen, ist selbst in unserem regenreichen Klima Meeressalz bis in die Sedimente der Kreideformation fein vertheilt. Da darf es uns nicht Wunder nehmen, wenn der Salzgehalt der Felsen in der Wüste ein so grosser ist, wenn jede Wüstenquelle Spuren von Salz enthält. Das Wüstensalz ist also thatsächlich Meeressalz, nur gehört es ursprünglich Formationen an, welche viel weiter zurückliegen, als das Diluvium.

Das Wasser der Quelle im Kloster St. Antonius ist mit Salz der Kreideformation beladen, das Salz, welches aus den Felsen des Mokkatam ausblüht, gehört der Eocänformation an, und das Salz der Ammonsoase ist miocän. Alles aber ist Meeressalz von wechselnder Zusammensetzung; denn es ist begreiflich, dass das Salz in den Felsen der Wüste, wenn es auch nicht durch beständige Regen

1) Dubocq, Zeitschr. für Allg. Erdkunde. Berlin 1857, p. 200.

2) Huyssen, Die Soolquellen des Westphälischen Kreidegebirges. Zeitschr. d. deutsch. geol. Gesellschaft. 1855, p. 17.

Digitized by Google

herausgelöst wird, doch durch die gelegentlichen Regen innerhalb der Gebirge seinen Lagerplatz verändern kann. Die leicht löslichen Kalisalze werden leichter entführt als die Natronsalze, tiefere Bänke werden salzreicher auf Kosten der darüber lagernden, und der Salzreichthum der unteren Mokkatamstufe ist meines Erachtens eine Folge davon, dass die braunen Bänke der oberen Stufe entsalzt und dieses Salz in die darunterliegenden weissen Kalke hineingetragen worden ist.

Wenn also auch das Salz die Wüste nicht verlassen kann, so circuliert es doch innerhalb der Wüste. Wo sich eine Depression befindet, nach welcher die seltenen Gewitterbäche strömen um daselbst zu versiegen, da muss sich das Salz anreichern, wo sich Spalten im Gestein finden, da wird es auskrystallisieren und in ewigem Wandern begriffen sein.

Die Mönche des Klosters St. Antonius gewinnen ihr Salz aus Gängen im Galâlagebirge. Bei El Golea (westlich von Abû Roâsch) findet sich das Salz in blätterigen Ausscheidungen in einem kalkigen Schutt, und der Boden einer Ebene am Fusse von el Gaâ ist auf weite Erstreckung nach Salz durchwühlt. Die Araber erzählen, dass sich nach einigen Jahren die schon einmal ausgebeutete Localität wieder anreichert.

Auf Taf. I, Fig. 5 ist ein Stück des Fasersalzes abgebildet. Es stammt aus dem Salzvorrath der Mönche im Kloster St. Anton, und obwohl das 8 cm dicke Stück bei der photographischen Aufnahme nicht günstig beleuchtet war, so erkennt man doch die faserige Structur desselben, und überzeugt sich leicht, dass eine dem Fasergyps ungemein ähnliche Bildung vorliegt. Fig. 4 derselben Tafel zeigt den Querbruch eines Stückes Blättersalz aus der Ebene zwischen Abû Roâsch und el Golea, die geschichtete Structur desselben ist deutlich sichtbar.

So darf es uns gar nicht Wunder nehmen, wenn das ursprünglich gleichmässig und fein vertheilte Salz sich allmählich an gewissen Localitäten mitten in der Wüste angehäuft hat, dass andere Regionen salzleer geworden sind.

»Am Tsadsee ist das Salz so absolut fehlend, dass die Leute, wenn die Caravanen von Bilma längere Zeit ausbleiben, aus der Asche einiger Bäume (Suak) eine Art Salz auslaugen« schreibt

Digitized by Google

Rohlfs[1]), nachdem er berichtet hat: »Die Salzminen von Bilma und Kalala (in Kauer) bestehen in grossen Gruben, welche von 20—30 Fuss hohen Schutthaufen umgeben sind. Das Wasser in diesen Gruben ist so salzhaltig, und die Verdunstung hier im Centrum der Wüste ist so gross, dass sich innerhalb einiger Tage eine mehrere Zoll dicke Kruste auf dem Wasser bildet, welche durchstossen und abgefischt wird. Ein grosser Theil von Centralafrika wird von hier aus durch die Tuareg, Tebu und Arabu mit Salz versorgt.«

Der »Salzgehalt der Wüstenluft« spielt in der Wüstenliteratur eine nicht unbedeutende Rolle, wenn es sich um die Erklärung der Verwitterung, der schwarzen Rinden u. s. w. handelt. Um den Salzgehalt der Wüstenluft zu bestimmen, hatte ich einen Aspirator mitgenommen und stellte denselben an einigen Chamsintagen, im Grûm bei Tor auf. Der Wind kam von Westen, hatte den Meerbusen von Sues bestrichen, so dass die Wahrscheinlichkeit gross war, Chlornatrium in der Luft zu finden. Drei Tage lang leitete ich 45 Liter Luft in kleinen Blasen durch einen mit schwarzem Papier umwickelten Glascylinder, gefüllt mit einer Silbernitratlösung. Auf meine Bitte hatte Herr Dr. H. Geuther in Jena die Güte, die Flüssigkeit zu untersuchen: »Die Silberlösung wurde mit wenig warmer Salpeterlösung digeriert, hierauf filtriert. Da alles Silber so gelöst wird, konnte der Filterrückstand nur noch aus Chlorsilber oder kleinen Verunreinigungen bestehen. Das Filter wurde, gut ausgewaschen, am gewogenen Platindraht verascht. Eine Zunahme des Platins nach dem Veraschen konnte nicht constatiert werden, demnach war eine wägbare Menge von Chlorsilber nicht vorhanden.« Trotz des negativen Resultates meiner Versuche ist es immerhin wahrscheinlich, dass man in einer grösseren Menge Luft Salz nachweisen wird. Denn es ist ganz klar, dass die vom Wind davongetragenen Theilchen salzhaltigerFelsen ebenfalls Salz enthalten, es ist zweifellos, dass der Gehalt eines Staubwindes in der Lehmwüste an Salz ziemlich bedeutend sein muss. Allein ich kann nicht verstehen, welche chemischen Wirkungen solcher lufttrockener Salzstaub im Wüstenwind ausführen solle. Corpora non agunt nisi fluida. Dieser Satz gilt im hervorragenden Masse von einer so festen Verbindung wie das Chlornatrium.

1) G. Rohlfs, Petermanns Erg.-Hefte XXV. p. 27 u. 49.

Digitized by Google

Es ist nicht verständlich, dass das trockene Kochsalz chemische Wirkungen ausüben sollte, welche grösser sind, als die des feuchten oder gelösten Salzes und ich glaube daher die Wirkung des »Salzgehaltes der Wüstenluft« gering anschlagen zu dürfen, da das Salz in der Wüstenluft nur staubförmig, mechanisch, schwebt, und nicht wie in der feuchten Seeluft im Wasserdampf gelöst enthalten ist.

Eine eigenthümliche, wenn auch unbedeutende Wirkung hat das Salz endlich in der Wüste, die ich hier nicht unerwähnt lassen darf.

Bei feuchtem Wetter beobachtet man mitten im Sand zwischen Bergzügen der arabischen Wüste eigenthümlich dunkle Stellen, die Schweinfurth treffend als »Ölflecke« bezeichnet. Es ist eine ungemein auffallende Erscheinung, wenn man mitten im hellgelben Sand eine scharf begrenzte dunklere Fläche sieht, ähnlich dem Schatten, welchen eine Wolke hervorrufen würde. Lange blieb mir diese Erscheinung unverständlich, bis ich zufällig die Lösung des Räthsels fand. Von einem Ritt aus Uâdi Hoff und G. Turrah zurückkehrend hatte ich anfangs den Eisenbahndamm verfolgt, dann ritt ich vor Cairo links ab durch die verfallenen Friedhöfe und Trümmerfelder von Altcairo. Der Tag war kalt und nebelfeucht gewesen, eine Art Scirocco hatte geweht, und trübe Wolken bedeckten den Himmel. Als ich über die Trümmerfelder ritt, bemerkte ich auf den thonigen Flächen eigenthümliche dunkle Bänder, 1—2 Fuss breit, welche wie die Grundrisse von Mauern, Häusern und Grabkammern aussahen. Meine Vermuthung fand ich bald bestätigt und beobachtete, dass unter jedem dieser dunkeln Bänder sich unterirdisch das Fundament einer Mauer befand, die aus (salzhaltigen) weissen Mokkatamkalken gebaut war. Das Salz dieser Mauersteine war nach oben in den lehmigen Schutt effloresciert, und hatte aus der feuchten Luft Wasser angezogen. Dadurch aber war das salzgetränkte Gebiet des Schuttes dunkler geworden und hob sich scharf von der salzfreien Umgebung ab.

Ich glaube, dass durch diese Beobachtung das Auftreten der »Ölflecke« genügend erklärt wird, als solcher Stellen, unter denen sich, im Sande vergraben, salzreiche Felsen befinden, deren Salz in den Boden effloresciert ist und Wasser anzieht.

Digitized by Google

VII. Die Beständigkeit des Klimas in Ägypten.

Alle unsere bisherigen Betrachtungen über die Oberflächenformen in der Wüste und deren Veränderung hatten den Zweck nachzuweisen, dass die Morphologie und Bildung der Wüste eine Wirkung der specifischen Wüstenkräfte sei. Keine einzige der oft so räthselhaften Erscheinungen in der Wüste verlangt die Annahme von meteorologischen Kräften, welche der heutigen Wüste fremd sind.

Ich weiss, dass ich mich durch diese Ansicht in Gegensatz stelle zu dem Urtheil hervorragender Forscher, welche die Wüste aus eigener Anschauung kennen gelernt haben; aber meines Erachtens sind die Gründe, welche für eine Constanz des Klimas sprechen, bedeutungsvoller als diejenigen, welche eine Veränderung des Klimas in den letzten Jahrtausenden zu beweisen scheinen, und meine Aufgabe soll es jetzt sein, die Thatsachen zu discutieren, welche für die letztere Ansicht ins Feld geführt worden sind.

Das äusserste Extrem finde ich in jener Meinung, welche die Wüste als trockengelegten Meeresboden betrachtet. Man schloss aus der vermeintlichen Depressionsnatur der Sahara, aus der Verbreitung des Sandes, des Salzes und versteinerter Meeresmuscheln mitten in der Wüste, dass noch während des Diluvium in Nordafrika ein grosses Meer bestanden habe und Escher von der Linth erklärte die Abnahme der Kälte am Schlusse der Eiszeit für eine Wirkung des eintrocknenden Saharameeres. Desor[1]) schreibt: »dass die Sahara noch Meer war, als die Alpen schon in ihrer jetzigen Gestalt existierten«.

Ich habe oben auseinandergesetzt, dass der Wüstensand kein Meeressand ist, dass das Wüstensalz fossiles Salz älterer Perioden sei; und die vermeintliche grosse Depression im Innern der Sahara beschränkt sich nach den genausten Nivellements, welche die französische Regierung anstellen liess, um das Saharameer wieder zu bewässern, auf ein enges Gebiet:

Das zu bewässernde Gebiet der Schotts zerfällt nach Roudaire[2]) in

1) das Bassin des Schott Melrir, 24 m unter dem Meere gelegen, 6700 qkm gross;

1) Desor, Aus Sahara und Atlas. Wiesbaden 1865, p. 48.

2) Le Mission des Chotts, p. 62.

Digitized by Google

2) das Bassin des Schott Rharsa, 24 m tief, 1540 qkm gross;
3) das Bassin des Schott Djerid, über dem Meere gelegen und 5000 qkm gross.

Das gesammte »centrale« Saharameer würde demnach eine Fläche von 13000 qkm bedecken, das ist ungefähr der $^1/_{1000}$ Theil von Nordafrika.

Obwohl die Beobachtungen der Wüstenreisenden ergaben, dass südlich von diesen Schotts die Wüste ein Hochland sei, dass abgesehen von wenigen Oasen (Siwah, Fayum etc.) keine Depressionen vorkommen, obwohl Zittel[1]) mit den trefflichsten Argumenten die Idee des Saharameeres widerlegt hat, so ist doch neuerdings Ch. Mayer-Eymar[2]) wieder darauf zurückgekommen und glaubt auf Grund der Pliocänfauna des »Uâdi Mallaha« südlich von Giseh, »dass die Sahara zur grossen Gletscherzeit zum Theil unter Meer war«, ja dass das »Meerwasser abnorm kalt war und der bei Assuan mündende Nil einen guten Theil des Jahres Eis trieb«.

Auf Wunsch des verstorbenen Prof. Neumayr in Wien sammelte ich die Fauna des Uâdi Mellaha, und Neumayr bestimmte darin sechs entschiedene tropische Formen, so dass hiernach der zweite Theil von Mayer-Eymar's Ansichten widerlegt erscheint, der erste Theil widerlegt sich durch die Topographie der libyschen Wüste.

Was endlich die versteinerten Muscheln in der Wüste anlangt, welche in ungeheuerer Menge den Boden bedecken, so hat sich herausgestellt, dass die Verbreitung von Cardium edule nicht über die Schotts hinausgeht, dass die Austernbänke an den Ufern des oberen Nils von einer austerähnlichen Süsswassermuschel Aetheria herrühren, und dass alle übrigen in der Wüste gefundenen Versteinerungen älteren Formationen angehören und, durch die in dem Abschnitt Kieswüste geschilderten Vorgänge bedingt, in so grosser Menge den Wüstenboden bedecken.

Von O. Fraas[3]) wurde aus der eigenthümlichen »verkehrten Erosionsform« der Uâdis und aus den Schottermassen in denselben der Schluss gezogen, dass der Sinai von Gletschern bedeckt gewesen

---

1) Zittel, l. c. p. 31 ff.

2) Mayer-Eymar, Zur Geologie Ägyptens. Vierteljahrsschrift der Züricher naturforschenden Gesellschaft. August 1886, p. 27.

3) O. Fraas, Aus dem Orient, p. 31 u. 206.

Digitized by Google

sei. Ich habe in einem früheren Abschnitt gezeigt, wie sich jene Erscheinung durch tectonische Störungen, diese durch die Vertheilung der Wüstenregen erklärt.

An einer anderen Stelle seines an fruchtbaren Gedanken und interessanten Beobachtungen so reichen Buches sagt Fraas: »Nirgends deutlicher, als in der Wüste, wo keinerlei Vegetation den Blick beirrt, tritt die erodierende und Schuttmassen bildende Kraft früherer Wasserströme und einer vergangenen regenreichen Zeit dem Auge entgegen. Wenn im Uâdi el Tih östlich von Cairo das Ausgehende der Schichten die Gestalt beistehender Figur (»Zeugen«) angenommen hat, die sich hundertmal im Kleinen, wie im Grossen wiederholt, so weiss Jedermann, dass keine andere Kraft als die des Regens, resp. des fliessenden Wassers solche Formen zu schaffen im Stande ist. Alle Thäler der Wüste sind alte Wasserläufe, alle Felsplatten, Zinnen und Zacken an den Bergen sind Reste alter Wasserstürze, und die ganze Sinaihalbinsel, wie die ungeheuere Landfläche im Osten und Westen des Nils giebt auf jedem Schritt und Tritt hierzu Belege.«

Ich habe in dem Abschnitt über die Formen der Felswüste ausführlich meine Meinung über diese Fragen ausgesprochen und verweise auf das dort Gesagte. Aber O. Fraas giebt selbst einen ungemein wichtigen Einwurf gegen seine Ansicht auf S. 196, wo er den Mangel von Humus als charakteristisch für die Wüste erwähnt. Nun ist es bisher noch nirgends gelungen, fossile Humusschichten in dem Alluvium Ägyptens zu entdecken. Allerdings schliesst Fraas a. a. O. Seite 199: »König Josia brachte nach biblischem Bericht zum Passah 3000 Rinder zum Morgenopfer; zu einem solchen Viehstand ist ein glänzender Wiesenwachs erste Voraussetzung; waren nun einst Wiesen und Wälder in Juda, so gab es auch einst Humus; gab es aber Humus, so gab es auch einen Wechsel von Sommer und Winter, es war mit anderen Worten das Klima ein anderes.«

Ich kann diese Schlussfolgerung nicht eher anerkennen, bis fossiler Humus in den Alluvionen Ägyptens in grösserer Verbreitung nachgewiesen wird.

Gerade mit Rücksicht auf Palästina sagt Dove[1]): »Das Klima

1) Dove, Zeitschr. des Vereins für Erdkunde. Berlin 1868, p. 187.

Digitized by Google

von Jerusalem ist jetzt noch genau so wie zur Zeit der Bibelbeschreibung« und ARAGO[1]) wies schon 1834 nach, dass das Klima Palästinas sich seit 3500 Jahren nicht geändert habe.

Im Uâdi Ashar der nördlichen Galâla fand SCHWEINFURTH[2]) »uralte Stammreste an einer Seitenwand des Thalgehänges, wo sie entschieden den ehemaligen Thalgrund andeuteten, weil an dieser Stelle die benachbarte Steilwand viele Jahrhunderte hindurch unverändert blieb. Da hätten sich wohl mit Fug und Recht Humusreste erwarten lassen sollen, falls zu einer Zeit, die von der heutigen durch das Werk der Vertiefung der Thalsohle um 30 Fuss getrennt ist, wirklich wesentlich andere Regenverhältnisse obwalteten. Denselben negativen Beweis könnte man an den Stellen der Travertinbildung am Rande der grossen Oase antreten, wenn man wollte. Die Frage der Beständigkeit des Wüstenklimas während der allerletzten geologischen Epoche drängt sich immer noch durch neue Beobachtungsobjecte auf. Sollte z. B. nicht auch in den »Salzverhältnissen« ein Beweismittel für die Stabilität des Klimas zu suchen sein?«

FRAAS und Andere haben auch die Thatsache, dass die Pyramiden und die Tempel der alten Ägypter auf Wüstenboden stehen, benutzt, um eine früher grössere Verbreitung des Culturlandes zu beweisen, obwohl es eher wunderbar sein würde, wenn es anders wäre. Denn erstens ist der Nilschlamm ein viel zu nachgiebiger Boden, um darauf Pyramiden zu errichten, zweitens fehlt dem Nilthal jener anstehende Felsen, in welchen bei Beginn eines Pyramidenbaues die Grabkammer eingehauen wurde, endlich schätzten die Ägypter das schwarze fruchtbare Nilerdenland viel zu hoch, um seine Fläche durch Colossalbauten zu verkleinern. Wenn das Culturland einst weiter ausgedehnt war, wenn diese altägyptischen Bauten auf einem ausgedehnteren Culturland errichtet worden wären, so müsste man doch an den Fundamenten dieser Bauten die Spuren des Culturbodens finden, der in der Umgebung später davongetragen worden sein soll. Statt dessen sprechen alle Thatsachen dafür, dass die alten Pyramiden und Tempel thatsächlich ausserhalb des Culturlandes erbaut

1) JAMES, Edinb. n. philos. Journ. 1834, April XVI, XXXII, p. 205.

2) Brief vom 2. Januar 1890.

Digitized by Google

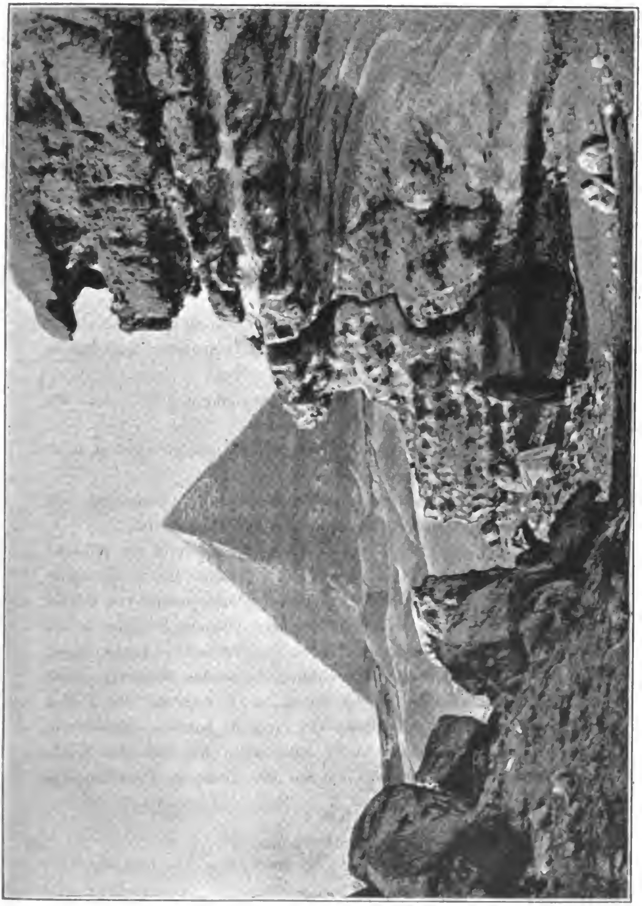


Fig. 96. Deflationserscheinungen bei den Pyramiden von Giseh.

Digitized by Google

worden sind, und dass sich seit Erbauung derselben die Grenze der Wüste und der schwarzen Nilerde nicht wesentlich verändert hat.

»Die[1]) Mauer (der Häuser von Kosseir) ist zusammengesetzt aus rohen ungebrannten Thonziegeln von länglich rechteckiger Form, wie sie schon die alten Ägypter, damals stets mit dem Regierungsstempel gezeichnet, für ihre Privatbauten brauchten, ihr Name »Tub« hat sich bis heute erhalten. Dieses Material ist eben nur für diese regenlosen Districte möglich, bei einem stärker andauernden Regen würde eine so erbaute Stadt in kurzer Zeit in einen Breihaufen verwandelt; und auch darin liegt ein Beweis, dass das Klima des alten Ägyptens so trocken wie das jetzige war.«

Unger[2]) untersuchte Ziegel aus der Zeit vor 1726 v. Chr. und kam zu folgenden Schlüssen:

1) Die landeseigenthümliche Vegetation von Ägypten und damit die Beschaffenheit des Klimas hat sich in ungefähr 4000 Jahren nicht geändert.
2) Hordeum vulgare und Triticum turgidum wurden schon vor 4000 Jahren im Grossen angebaut.
3) Eine Veränderung des Artcharakters scheint nicht stattgefunden zu haben.
4) Holzarmuth des Landes hat schon damals die Benutzung von Stroh und Mist als Feuermaterial nöthig gemacht.

»Niemals[3]) ist ein Strom süssen Wassers weder durch das Wüstenplateau noch durch die Oaseneinsenkung geflossen. Der vielgenannte Bahr-bela-ma schrumpft auf ein Thälchen am Nordostrande von Dachel zusammen. Es finden sich in dem ganzen von uns bereisten Stück der lybischen Wüste keinerlei Spuren von fluviatilen Ablagerungen oder von der mechanischen Einwirkung fliessenden Wassers. Auch von einer Ausbreitung der Vegetation etwa während der Eiszeit über gewisse Wüstenstriche lassen sich nirgends Anzeichen entdecken. Nach allen von uns beobachteten Thatsachen hat sich die Wüste kaum verändert, seitdem die Fluthen des früheren Diluvialmeeres

1) Klunzinger, Bilder aus Ägypten. Stuttgart 1878, p. 4.

2) Unger, Sitzungsber. Acad. d. Wissensch. Wien. Jan. 1862. II, p. 88. Petermanns Mitth. Bd. 9, p. 238.

3) Ascherson, Petermanns Mitth. Bd. 20, p. 183.

Digitized by Google

(sollte besser heissen Tertiärmeeres) diesen Landstrich verlassen haben; sie ist steril und vegetationslos gewesen seit ihrem Bestehen und wird Wüste bleiben, solange nicht tiefgreifende geologische Veränderungen die jetzigen Grundzüge in der Vertheilung von Wasser und Land umgestalten.« So urtheilt ASCHERSON, einer der besten Kenner der ägyptischen Wüstenflora.

Und über die westliche Sahara urtheilt DUVEYRIER[1]: »Par le témoignage de Juba, confirmé par Pline et par d'autres encore, il devient évident que la partie du Sahara dont je m'occupe, était déja, il-y-a dix-huit cents ans, sinon sous le rapport de la quantité des eaux, du moins sous le rapport des sables et de leur circulation, telle qu'elle s'est présentée à mon observation.«

Eine der wichtigsten Thatsachen für die lange Constanz des Wüstenklimas ist die Vertheilung des Salzes. In einem regenreichen Klima wäre es ganz unmöglich, dass soviel Salz in den oberflächlichen Felsen vorhanden bliebe, wie wir in der Wüste beobachten, es würde längst aus den Felsen herausgewaschen sein.

Endlich ist der Fangdamm, den SCHWEINFURTH im Uâdi Guerraui entdeckte s. Fig. 13 und dem sich unzählige ähnliche, verfallene Fangdämme in der Cyrenaika anschliessen, ein Beweis dafür, dass es dort vor Jahrtausenden ebenso selten geregnet hat wie heutzutage.

Indem ich also meine auf Beobachtungen und die Urtheile hervorragender Forscher gestützte Ansicht dahin ausspreche, dass die Wüste Nordafrikas ein hohes Alter besitzt und dass das Klima von Ägypten in historischer Zeit keine wesentlichen Änderungen erfahren hat, gebe ich gern zu, dass geringe Klimaschwankungen vorgekommen sind, dass die Vegetationsarmuth local früher geringer war als heutzutage.

Im Uâdi Maghara und am G. Suffr an der Sinaihalbinsel finden sich Schmelzschlacken in einer Gegend, wo man heute vergeblich das zum Metallschmelzen nöthige Holz suchen würde.

»Im Thal[2]) Meschru in der Wüste zwischen Fesan und Kauar finden sich viele bis 50 Fuss hohe Neulinge; da das Thal jetzt ganz baum- und krautlos ist, so muss man annehmen, dass die früher reichere Vegetation verschwunden ist.«

1) DUVEYRIER, Les Touareg du Nord, p. 43.

2) ROHLFS, Petermanns Erg.-Hefte 25, p. 16.

Digitized by Google

Die Beduinen der Sinaihalbinsel, welche wohl seit Jahrhunderten aus kümmerlichen Tamariskenstämmen Holzkohle brennen und damit die Schmiede und die Haushaltungen Ägyptens versehen, haben gewiss viel Vegetation verwüstet und den Wüstencharakter des Sinai vervollständigen helfen, allein man darf diese Erscheinung nicht überschätzen und auf eine früher vegetationsbedeckte Landschaft schliessen.

K. v. ZITTEL[1]) fand in einem Süsswasserkalk der Oase Chargeh Blätter von Quercus ilex und schliesst daraus, dass dieser Süsswasserkalk unter einem regenreicheren Klima gebildet worden sei, als gegenwärtig dort herrscht.

Bei der Beurtheilung dieser Frage muss aber in erster Linie darauf hingewiesen werden, dass das geologische Alter dieses Süsswasserkalklagers (das 3 m dick, 300 m hoch und einen Kilometer lang war) nicht festgestellt ist und vielleicht in jene frühen Zeiten des Tertiärs hinabreicht, wo nachweislich das Meer grosse Theile Nordafrikas bedeckte. Aber wenn wir selbst annehmen wollten, dass dieser Süsswasserkalk eine Bildung sei, die in historischer oder prähistorischer Zeit erfolgte, so ist damit noch nicht bewiesen, dass damals das Klima der Oasen so grundverschieden war von dem Klima der Gegenwart. Nach Mittheilungen von G. SCHWEINFURTH ist Quercus ilex in den Mittelmeerländern sehr weit verbreitet, sie findet sich in Griechenland, Macedonien, Kreta, Pontus, an der Syrischen Küste und in Nordafrika und es ist nicht ausgeschlossen, dass die Verbreitung dieser Art vormals eine noch grössere war, ohne dass man daraus auf eine grundlegende Veränderung des Klimas schliessen dürfe.

Wir dürfen das um so weniger thun, als dem Fund von Quercus ilex in der Oase Chargeh die Beobachtung SCHWEINFURTH's[2]) gegenüber steht, wonach Picris coronopaifolia Aschrsn. unter den aus Weidenblättern zusammengesetzten Blumengewinden der Mumie der Prinzessin Noi-Chonsu von der XXII. Dynastie (1000 vor Christus), welche der grosse Gräberfund von Der-el-Bahari zu Tage förderte, in einer grossen Anzahl von Blüthenköpfen gefunden wurde. »Diese

1) ZITTEL, Palaeontographica. XXX, p. 141.
2) Berichte der deutschen bot. Ges. Berlin, 25. Juli 1884.

Digitized by Google

Composite ist für die Flora des Wüstenrandes von Mittel- und Oberägypten sehr charakteristisch und dürfte als Zeuge für eine Stabilität des Klimas seit 3000 Jahren gelten.«

Ebenso wenig darf man die künstlich zubehauenen Feuersteine, welche Schweinfurth im Uâdi Ssannûr und in der Oase Chargeh, Zittel am Regenfeld entdeckte, als einen Beweis für eine Änderung des Klimas betrachten. Bekanntlich benutzen die meisten Beduinen Flintengewehre mit Feuersteinschloss; die Kugel hämmern sich die Sinaibeduinen aus einem Stück Blei, das Pulver bereiten sie mit natürlichem Schwefel vom Djebel Djimseh, die Kohle brennen sie aus Tamariskenholz und nur den Salpeter erhalten sie im Tauschverkehr. Die Feuersteine aber werden an gewissen Stellen der Wüste geholt, wo local die feuersteinreiche Kreide durch Dislocation zu Tage tritt. Einer der Hauptorte für Feuersteinindustrie ist Abû Roâsch, wo ganze Werkstätten für Flinte sind und wo man sehen kann, wie die Feuersteinkugeln zuerst mit einem spitzen Hammer in Scherben geschlagen und dann weiter bearbeitet werden mit einem kleinen Instrument von beistehender Form Fig. 97, dessen Schlagstück eine weiche gekrümmte Eisenplatte ist, während der Stiel in einem Handgriff steckt, der aus einem Maisfruchtstand gemacht ist.

Fig. 97. Flint-Schlägel der Fellachen von Abû Roâsch.

Die Feuersteinlocalität NW vom Uâdi Ssannûr habe ich selbst besucht. Auf Tagereisen weite Entfernung ist ringsum keine menschliche Niederlassung, und doch ist dort ein grosses Terrain auf 4 m Tiefe ganz durchwühlt und nach Feuersteinknollen durchsucht. Dieselben werden auch, wie man aus dem umgebenden weiten Scherbenfelde schliessen darf, hier sogleich zugehauen, und dass solches in neuester Zeit noch geschieht, ist leicht zu erkennen. Sobald es einem Beduinenstamm an Flinten mangelt, werden wohl einige Männer nach dem Uâdi Ssannûr geschickt um dort Feuersteine zu graben, dieselben zuzuschlagen und mitzunehmen. So wird jeder Stamm seine Kreidelocalität haben, wo er sich mit Flinten versorgt. Nur mit geringer Wahrscheinlichkeit wird man aus dem Auftreten solcher Scherbenhügel mitten in der Wüste schliessen können, dass die betreffende Localität eine reiche Vegetation besessen habe, und zum Wohnsitz für sesshafte Menschen gedient haben kann und dass überhaupt

Digitized by Google

diese Feuersteinarbeiten einer Zeitepoche angehören, welche der Steinzeit in Europa äquivalent sei. Wir schliessen uns SUESS[1]) an, welcher sagt: »Alle die ältesten Reste ägyptischer Cultur und die vielleicht noch weit älteren Überbleibsel der Steinzeit, welche in demselben Gebiete angetroffen worden sind, erweisen sich jünger als der weitaus grösste Theil des fluviatilen Schwemmlandes und folglich noch unvergleichlich viel jünger als die Spuren des alten Meeres; und alle Jahrtausende menschlicher Geschichte geben keine Parallaxe der Zeit, und keinen auch noch so entfernten Anhaltspunkt zur ziffermässigen Abgrenzung der Äonen, während welcher die hydographischen Verhältnisse Ägyptens bis zum heutigen Tage im Wesentlichen gleich geblieben sind.«

Den localen Verwandlungen von vegetationsreicheren Gebieten zu kahler Wüste stehen sogar wohlbeglaubigt entgegengesetzte Vorgänge am Südrande der Sahara gegenüber. ROHLFS[2]) schreibt: »Das ganze wellenförmige Terrain von Kufe bis zum Tsad, jetzt ein grosser vorzugsweise aus Mimosen und Hadjilidj zusammengesetzter Wald, war gewiss einst ein Theil der Sahara, und zwar Dünenformation. Wenn man heute nur etwas tief gräbt, so stösst man auf Sand, wie man ihn in den Dünenregionen findet, und selbst an der Oberfläche ist die Humusformation noch nicht vollendet. Wenn die Wüste nach Norden vorzudringen scheint, so wird dies dadurch ausgeglichen, dass von Süden her Wald und Vegetation siegreich gegen die Wüste vorrücken, und da das Gebirge im Norden von Agidir bis Choms dem Vordringen des Sandes ein natürliches Hinderniss entgegenstellt, so ist vorauszusetzen, dass die Wüste einst gänzlich verschwunden sein wird. Hauptursache dieses gewaltigen Fortschrittes der Vegetation von S. nach N. auf Kosten der Wüste und der Sanddünen insbesondere, sind nun eben die in der südlichen Hälfte der Sahara herrschenden Winde. Dieser feuchte Meereswind, in der Regenzeit durch einen oberen SO.-Wind verstärkt, führt Tag für Tag der Wüste Samenkörner und die nöthige Feuchtigkeit zum Aufkeimen zu, und er wird keineswegs durch einen anderen von NO. oder NW. kommenden Wind, wie es im Norden der Fall ist, aufgehoben. Ich denke

1) SUESS, Antlitz der Erde. Bd. II, p. 574.
2) ROHLFS, Petermanns Erg.-Hefte 25, p. 56.

Digitized by Google

in 50 Jahren wird die Tintümma nicht mehr eine krautreiche Steppe sein, sondern ein mit Mimosen bedeckter Wald; und die fossilienreichen Adedünen werden so reiche Weide bieten, wie heutzutage die Tintümma, die ehedem nichts als eine Sandfläche war.«

VIII. Rückblick.

Zwei Zonen vegetationsloser Gebiete lassen sich um die Erde verfolgen, beide eingeschaltet zwischen Tropenklima und die Länder der gemässigten Zone s. Fig. 98. Auf der nördlichen Halbkugel ist diese Zone besonders stark entwickelt. Beginnen wir mit Nordafrika, das vom

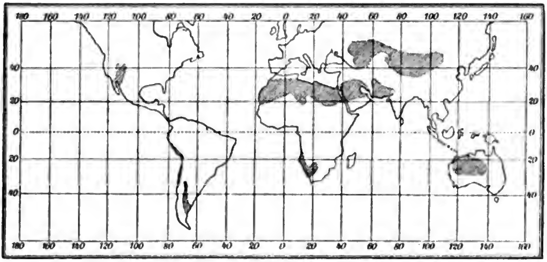


Fig. 98. Verbreitung der Gebiete mit einer jährlichen Regenmenge unter 20 cm nach Hann (Loomis). Berghaus, Phys. Atlas Nr. 37.

Atlantischen Ocean bis zum Rothen Meer als Wüste uns entgegentritt, so folgt nach Osten die Wüste von Syrien und Arabien, dann die Wüsten von Turkestan und Persien, die Wüste Thurr in Nordindien und endlich die Steppen- und Wüstenregion von Gobi und Nordchina. Auf dem nordamerikanischen Continent treten in denselben Breiten die californischen und mexikanischen Wüsten auf.

Die Wüstenzone der südlichen Halbkugel umfasst einige ausgedehnte Gebiete, aber auch hier wird das regenarme Land vom 15. und 50. Breitengrade begrenzt. Wir finden in Südafrika die Kalahari und die Wüsteneien der Tranvaalstaaten, in Australien die centralen Wüsten des Inneren und in Südamerika die Atacama.

Also lehrt uns schon die Betrachtung der geographischen Ver-

Digitized by Google

breitung der Wüsten- und Steppengebiete, dass dieselben keineswegs regellos auf der Erde verstreut sind, sondern von bestimmten klimatischen Factoren abhängig, eine bestimmte geographische Lage besitzen.

Diese Gesetzmässigkeit des Auftretens der Wüsten fällt uns nicht minder auf, wenn wir ein einzelnes Wüstengebiet studieren und die inneren Zusammenhänge enthüllen, welche zwischen bestimmten Wüstenformen und bestimmten klimatischen und geologischen Bedingungen bestehen. Dann sehen wir, dass die Wüste keine Ausnahme, kein lusus naturae ist, sondern dass sie in ihrer Ausdehnung und ihren Oberflächenformen von ebenso festen Gesetzen beherrscht wird, wie ein Flusssystem oder das Gletschergebiet eines Gebirges. Wir werden zu der Ansicht geleitet, dass ebenso wie unter bestimmten klimatischen Bedingungen die Gletscher sich ausdehnen und weite Regionen unter ihren Eismassen begraben können, in derselben Weise auch die Wüste ihre Grenzen überschreiten und wie eine Seuche verheerend, weite Flächen siegreich sich unterwerfen kann.

Wir lernen, dass jede Veränderung der Klimazonen auf der Erdoberfläche, jede Verschiebung der Eismassen an den Polen, jedes Übergreifen tropischer Vegetation in kühlere Zonen, auch eine Verschiebung der Wüstengürtel im Gefolge haben muss, dass wir mithin vom geologischen Standpunkte mit »fossilen Wüsten« ebenso rechnen müssen, wie wir uns gewöhnt haben von fossilen Gletschergebieten und vom tropischen Klima ausserhalb der jetzigen Tropengürtel zu sprechen.

Sodann erkennen wir beim Studium der mannigfaltigen Ablagerungen, welche wir in der Wüste beobachten, dass in der Gegenwart ungeheuere Räume des festen Landes sich im Laufe der Zeiten mit geschichteten oder ungeschichteten Sedimenten bedecken, die geologisch erhaltungsfähig in den Verband der Schichtgesteine geologischer Perioden aufgenommen werden; dass sie sich einschalten können zwischen rein marine Sedimente, oder zwischen Sedimente einer Binnenseebildung in der gleichen Weise, wie marine Sedimente festländischen Wüstenablagerungen sich einschalten und mit ihnen wechsellagern können.

F. von Richthofen hat uns zuerst gelehrt, dass auch auf dem festen Lande Ablagerungen gebildet werden. Die Anregung welche ich ihm verdanke, hat mich veranlasst, die äolischen Gebilde der

Digitized by Google

Wüsten zu untersuchen und dadurch einen Beitrag zu liefern zu der Kenntniss festländischer Sedimente.

Dieser Begriff könnte als widerspruchsvoll betrachtet werden, aber thatsächlich bezeichnet man viele Gesteine mit dem Wort Sedimentgestein, obwohl sich nachweisen lässt, dass sie nicht im Meere gebildet worden sind. Mag man hypothetische »Binnenseen« oder fragwürdige »Strandbildungen« in ihnen vermuthen, sicher sind die Mehrzahl der Sandsteine nicht im Meere, sondern auf dem Festlande entstanden. Und von diesem Gesichtspunkt aus müssen wir die Festländer auch studieren und müssen untersuchen, welcher Art die Sedimente sind, die hier ohne Hilfe des Meeres gebildet werden.

In dem letzten Jahrzehnt hat die einmüthige Arbeit vieler Geologen gezeigt, welche ungeahnte Bedeutung die festländischen Ablagerungen besitzen, welche durch Gletschereis gebildet und transportiert werden; schon gelingt es, die Spuren glacialer »festländischer« Sedimente in älteren Formationen zu entdecken und eine Eiszeit der Carbonperiode nachzuweisen, welche an Bedeutung von der tertiären Eiszeit kaum übertroffen werden dürfte. Möchte es gelingen, auch die festländischen Ablagerungen fossiler Wüsten in den Schichten der Erde zu entdecken, und dadurch eine immer gestaltungsreichere, tiefere Kenntniss von dem Zustand der Erdrinde in längst verflossenen Perioden zu erringen.

Wir hatten in der Einleitung fünf Fragen aufgestellt, zu deren Beantwortung ich eigene und fremde Beobachtungen in den vorhergehenden Abschnitten zusammengestellt habe. Wir wollen jetzt versuchen, auf Grund der geschilderten Thatsachen jene Fragen zu beantworten.

Wenn wir die wüstenbildenden Kräfte nach ihrer geologischen Bedeutung, nach der Intensität ihrer Wirkung aufzählen wollten, so müssen wir beginnen mit jenem Vorgang, den ich oben als Deflation bezeichnet habe. Es giebt eine ganze Anzahl von Kräften, welche zerstörend auf die Felsen in der Wüste einwirken, aber ihre Thätigkeit würde bald erlahmen, sie würden nicht einmal imstande sein, cumulative Zersetzungsproducte anzuhäufen, wie es im Tropenlande geschieht. Alle Zerstörung der Gesteine in der Wüste ist oberflächlich, keiner der Processe geht weit in die Tiefe, und so

Digitized by Google

würde die Denudation in der Wüste bald ihr Ende erreichen, wenn die Deflation nicht wäre. Aber die, durch keine Pflanzendecke gehinderte, bewegte Luft, deren Geschwindigkeit in der Wüste der Schnelligkeit des Windes auf offenem Meere gleichkommt, diese mit unglaublicher Eile dahinbrausenden Winde heben alles gelockerte Gesteinsmaterial empor, tragen es fort und legen es erst fern von seinem Ursprungsort am Rande der Wüste nieder. Dieser Vorgang vollzieht sich in der Wüste Tag und Nacht, Jahr aus Jahr ein, und nur dadurch wird es verständlich, dass die Denudation in der Wüste so intensiv wirkt und in so tiefgreifender Weise hochaufragende Gebirge niederzureissen vermag. Deshalb erscheint die Wüste so rein, so staubfrei, weil alles stäubende Material durch Deflation entfernt wird. Deshalb sieht man Denudationswirkungen ohne Denudationsproducte, 6000 Fuss hohe Granitsteilwände ohne Gehängeschutt, tief eingeschnittene Uâdis ohne Geröllager, steil emporragende Zeugen ohne einen schuttbekleideten Fuss. Deshalb sind tiefe Höhlen in den Felsen gegraben ohne dass man darin gelockertes Material bemerkte, deshalb ragen Pilzfelsen aus der Ebene mit breitem Hut und verengtem Stiel. Alle diese typischen Wüstenerscheinungen sind ohne Deflation nicht denkbar und vielleicht verdanken jene ungeheueren Kessel mitten in der Wüste, die man als Oasen bezeichnet, ebenso wie die räthselhaften topographischen Depressionen keiner andern Ursache ihre Entstehung als der Deflation, jener gespensterhaften Kraft, die an keine Schwere gebunden ist, welche nichts verschont, das nicht fest ist, welche ohne Unterbrechung ihre geheimnissvolle Wirkung äussert. Die Insolation, die Verwitterung, das Sandgebläse, sie sind nur die Diener der Deflation, sie sind die stillen Bergleute, die, sei es bei Tag, sei es bei Nacht, am Felsen hämmern und bohren, deren Thätigkeit an jedem Felsblock zu sehen ist, aber nur in negativen, nicht in positiven Merkmalen. Denn was sie schaffen, was sie lockern, das nimmt ihnen noch unter den Händen die Deflation fort und entführt es in alle Winde.

Zwei Brüder sind Insolation und Verwitterung, und brüderlich haben sie sich in die Arbeit getheilt. Wenn der erste Sonnenstrahl, der die Memnonssäule erklingen liess, über die weite Hamada blitzt, dann beginnt die Insolation ihr Werk. Es springen die Gesteine, der Granit zerfällt zu lockerem Grus und schalig blättern die

Digitized by Google

weicheren Mergelbänke, so dass die überhängende Kalkbank polternd zur Tiefe stürzt. Wenn aber im Westen purpurfarben das strahlende Gestirn versinkt und nach kurzer Dämmerung das Zodiakallicht im

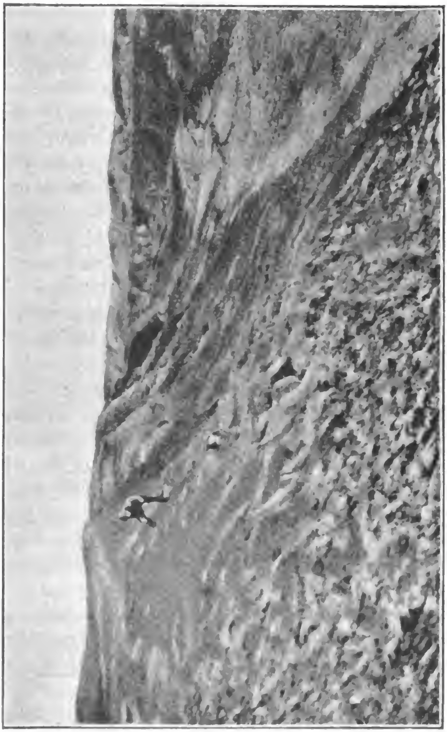


Fig. 99. Das untere Uâdi Dugla vgl. die Karte Fig. 32, p. 412.

milden Schimmer emporsteigt, dann geht die Insolation zu Ruhe und überlässt dem stilleren Bruder, der am Tage im dunkeln Schatten versteckt war, das Feld der Arbeit. Dann vertiefen sich die Höhlen

Digitized by Google

in den Säulengängen, es lockern sich die chemisch zersetzbaren Felsarten und es entsteht manch räthselhafter Block.

So wechseln Insolation und Verwitterung Tag und Nacht das Arbeitsfeld, zwischen ihnen kommt es nur selten zum Streit, und ruhig vollziehen sie ihre Arbeit, deren Leistung deshalb so schwer abzuschätzen ist, weil die Deflation alles forträumt, was sie geschaffen haben.

Ein aufdringlicher Gesell ist das Sandgebläse, der stete Begleiter der Deflation, dessen Thätigkeit überall und stets in der Wüste zu finden ist, dessen denudierende Kraft aber vielfach überschätzt wird. Wohl kann man an allen Felsen Sandschliffe, Spuren der wetzenden Thätigkeit des vom Winde getriebenen Sandes erkennen, wohl sind die Spuren des Sandgebläses so häufig, dass manche Reisende diese Kraft als die wirksamste Kraft in der Wüste geschildert haben; allein ich glaube dass diese Kraft, weil ihre Spur leicht zu erkennen ist, vielfach überschätzt wird, jedenfalls ist sie geringfügig gegenüber der Deflation, und ihre Wirkung erreicht kaum jene Leistungsfähigkeit der Insolation bei der Zersprengung einfarbiger und der Zerbröckelung vielfarbiger Gesteine.

Die erodierende und transportierende Thätigkeit des Wassers ist in der Wüste geringfügig, denn es regnet nur selten. Die rasch und mit grosser Wasserfülle herabstürzenden Regengüsse vermögen allerdings in kurzer Zeit mehr zu leisten, als ein stetig rinnendes Gewässer, und die Vereinigung der Uàdis zu hydrographischen Thalsystemen, die Aufschichtung grosser Geröllmassen an den Ufern und der Mündung von Wüstenthälern ist der Thätigkeit solcher Regengüsse zu danken, allein sie spielen immerhin eine für die Modellierung der Wüstenlandschaft nur geringfügige Rolle und haben auch nie in der Wüste einen bestimmenden Einfluss auf die Bodengestaltung gehabt.

Wir hätten endlich der Vegetation zu gedenken, deren spärliche Verbreitung in der Wüste ihre geringe Bedeutung genügend erklärt. Nur die Neulinge sind eine durch Pflanzenwuchs bedingte, wenn auch unbedeutende Erscheinung.

Ausser diesen bekannten Kräften sehen wir aber in der Wüste noch manches Phänomen, das uns räthselhaft erscheint, und als dessen Ursache wir bislang unerkannte Vorgänge annehmen müssen. Die Bildung der braunen Schutzrinde und der in ihrem Gefolge

Digitized by Google

auftretenden Säulengänge und Pilzfelsen, das sind Thatsachen, die so fremdartig erscheinen, dass wir auf besondere Ursachen schliessen müssen, deren Bedeutung nur angedeutet, deren Causalzusammenhang vorläufig nur geahnt werden kann. In wie weit Ozon und Electricität in dem Zusammenspiel der Wüstenkräfte betheiligt sind, welche Erscheinungen durch sie bedingt werden, entzieht sich bislang ebenfalls unserer Kenntniss.

Überblicken wir aber alle diese verschiedenartigen Kräfte und verfolgen wir mit Sorgfalt die Wirkungsweise jeder einzelnen und ihr Zusammenwirken mit den andern, so ergiebt sich uns eine fremdartige Combination bekannter Componenten. Die Wirkung von Kräften, welche in unseren Breiten tonangebend sind, schrumpft in der Wüste zusammen, und statt dessen entwickeln andere Kräfte, die man bei uns in ihrer Wirkung leicht übersieht, eine staunenswerthe Leistungsfähigkeit.

Die sonderbaren Oberflächenformen der Wüste sind also nicht ein Product fremder unbekannter Kräfte, sondern verändert ist nur die Intensität der Wirkung bekannter meteorologischer Kräfte, sei es im positiven, sei es im negativen Sinn.

Sobald wir uns vertiefen in die Vorgänge, welche in der Wüste denudierend thätig sind, so erkennen wir überall alte Bekannte wieder, aber die Erosion, die wir früher als Riesen gekannt haben, tritt uns in der Wüste als Zwerg entgegen; und dafür tauchen gewaltige Gestalten und kühne Recken vor uns auf, die wir vorher nur als schwache Schatten kannten. Der Massstab verändert sich, die Leistungsfähigkeit wechselt, aber die Factoren sind dieselben.

Dass anders combinierte Kräfte auch eine andere Wirkung äussern, ist leicht verständlich. Daher dürfen wir uns nicht wundern, wenn wir in dem Landschaftsbild der Wüste manch' seltsamer Erscheinung begegnen.

Ein mehr oder minder durch Dislocation zerbrochenes Bergland, zusammengesetzt aus Urgesteinen, vulkanischen Gebilden und Sedimenten, wird von dem Wüstenklima erobert, und sofort beginnt dieses an tausend Punkten sein Zerstörungswerk. Das Resultat wird bedingt sein einerseits von der Wirkungsart der specifischen Wüstenkräfte, andererseits von den verschiedenen Eigenschaften verschiedener

Digitized by Google

Gesteine. Ein Granitgebirge wird anders modelliert als ein Sandsteinplateau, ein einförmiges Tafelland anders als ein aufgebrochenes Gewölbe. Ich habe in dem Abschnitt: »Formen der Felswüste« eine Anzahl Fälle herausgegriffen und an ihnen geschildert, wie der Denudationsvorgang in der Wüste verläuft. Diese Fälle könnten noch vielfach vermehrt werden, aber allen gemeinsam ist die Erscheinung, dass ihre Denudationsformen sich wesentlich unterscheiden von den Denudationsformen eines anderen Klimas.

Wir finden Schluchten, welche unseren Erosionsschluchten ähneln, doch wenn wir sie näher untersuchen, so sind sie mit Circusthälern verziert und enden mit steilen Felswänden. Wir sehen Berge, welche glacialen Rundhöckern ähneln, doch ist keine rauhe Leeseite an ihnen zu bemerken; daneben finden wir Granitgebirge, deren vielzackige Gipfel den Dolomiten von Südtirol gleichen, und Zeugenberge, die den Kuppen der sächsischen Schweiz ähnlich sehen, obwohl wir tiefgreifende Verschiedenheiten leicht nachweisen können.

Die Wirkungsweise jeder einzelnen meteorologischen Kraft ist in den einleitenden Abschnitten besprochen worden und ich verweise auf die betreffenden Kapitel, wo die Frage nach ihrer Wirkungsart eingehend beantwortet wurde.

Es ist das Endziel aller Denudation auf der Erde, die durch Dislocationen oder vulkanische Thätigkeit erzeugten Höhenunterschiede auf der Erdoberfläche einzuebnen und eine Denudationsfläche zu erzeugen, auf welcher die Denudationsproducte aufgeschichtet sind, sofern sie nicht weiter transportiert wurden.

Die Denudationsvorgänge im Tropenland, im Glacialgebiet, in Erosionslandschaften, am Meeresstrand unterscheiden sich in wesentlichen Eigenschaften von einander, und auch die äolische Denudation hat in ihrer Wirkung und ihren Resultaten bestimmte Charaktere.

Ebenflächigkeit der Denudationsebene ist ein wesentlicher Charakter der Deflation, und alle jene »fertigen« Wüsten, die als Sserir, als Hamada, als Sebcha tagereisenweit sich erstrecken, ohne merkbare Niveauunterschiede, sind Denudationsflächen, entstanden durch Deflation.

Die Denudationsproducte, die Sedimente, in der Wüste sind viererlei Art. Eine derselben ist allerdings nur in den ersten Stadien der Wüstenbildung, in den Felswüsten häufig. Es sind das die

Digitized by Google

Schotter, welche im Verlauf der Uâdi sich anhäufend, local eine grosse Mächtigkeit erreichen können, deren Blöcke wirr durcheinanderliegend, bald scharfkantig, bald gerollt erscheinen.

Ist aber erst die Felswüste eingeebnet, ist statt der dislocierten Berglandschaft nur noch eine Deflationsebene vorhanden, dann giebt es auch keine Uâdischotter mehr, und drei andere Sedimente bedecken die Fläche der Wüste: Kies, Lehm oder Sand. Der Kies ist bald gerundet, dann spricht man von Sserîr, bald scharfkantig, dann entsteht die Hamada; je nachdem das Gestein leichter durch Insolation zersprengt oder leichter durch Sandgebläse gerundet werden kann.

Ähnlich verknüpft wie Sserîr und Hamada sind Sand- und Lehmwüste. In der einen finden wir den Quarz, in der andern den Feldspath zerstörter krystallinischer Gesteine wieder.

Die Aufbereitung dieser Sedimente in der Kies- und der Lehmwüste ist nicht leicht zu untersuchen; dagegen konnten wir für die Sandwüste feststellen, dass Sandsteinbänke, bisweilen mit eingeschalteten Thon- oder Geröllagen, häufig mit Diagonalschichtung, mit Fährten, Regentropfenspuren, fossilem Holz etc. gebildet werden.

Sodann suchten wir die Ansicht mit Thatsachen zu belegen, dass das Relief der Wüste einzig und allein durch die Kräfte gebildet worden ist, welche heutzutage in der Wüste wirksam sind; dass weder Meeresfluthen noch Regengewässer von ungewohnter Stärke, noch Gletscher als bildende Ursachen angenommen werden müssen, um jene sonderbaren Oberflächenformen zu erklären, die wir in der Wüste beobachten. Ja wir kamen sogar zu der Überzeugung, dass das Klima der ägyptischen Wüste in vier Jahrtausenden historischer Geschichte im Grossen unverändert geblieben ist, dass die Wüste zur Pharaonenzeit ebenso existierte, wie in der Gegenwart.

Die letzte der eingangs gestellten Fragen: Woran erkennt man fossile Wüsten? lässt sich mit kurzen Worten nicht beantworten; die Antwort liegt in der ganzen Abhandlung, deren Aufgabe es war, gerade diese Frage zu erörtern und die Wüste zu erklären aus der Wüste.

Digitized by Google

Erklärung der Lichtdrucktafeln.

Sämmtliche Stücke sind in natürlicher Grösse dargestellt. Die beigefügten Zahlen geben die Seite an, auf der das betreffende Stück besprochen wird.

Tafel I.

Figur 1. Halbzersprungenes Quarzgeröll aus dem Schotter des Uâdi Gharandel S. 106.

Figur 2. Zersprungenes Kalkgeröll aus dem Schotter des Uâdi Gharandel S. 106.

Figur 3. Halbzersprungenes Porphyrgeröll vom Râs Muhámmed S. 106.

Figur 4. Blättersalz (Querbruch) aus der Schuttebene südwestlich von Abû Roâsch S. 190.

Figur 5. Fasersalz aus dem Kloster St. Antonius S. 190.

Figur 6. Ausgehöhlte Rinde eines Kalkfelsens vom Dj. Turra S. 122.

Figur 7. Thon aus dem vertrockneten Bett des Uâdi Arabah, mit Regentropfenspuren bedeckt S. 181.

Figur 8. Kalkstein durch Kameltritte glatt poliert (pseudoglacialer Schliff) vom Aufstieg aus dem Uâdi Ashar nach dem Plateau der südlichen Galâla S. 101.

Figur 9. Durch Deflation herausmodellierte Pseudodiadema im Kreidekalk vor den Häusern von Abû Roâsch S. 37.

Tafel II.

Figur 1. Feuersteinkugel durch Insolation gesprengt mit secundären Sprungnarben aus dem Arabagebirge S. 107.

Figur 2. Kreisrunde Scherben von Feuerstein mit secundären Sprungnarben, die theilweise schon wieder durch Sand glatt geschliffen wurden, aus dem Kreidegebiet von Abû Roâsch S. 107.

Figur 3. 4. Jaspisstücke mit runden Sprungnarben, aus der Kieswüste westlich von den Pyramiden S. 107.

Figur 5. Jaspisgeröll mit kreisförmiger Sprungnarbe vom Ost-Plateau des Mokkatam S. 107.

Figur 6. Durch Insolation zersprengtes Feuersteingeröll vom Mokkatam S. 107.

Figur 7. 8. Durch Insolation in zwei Hälften zersprengtes Feuersteingeröll vom grossen versteinerten Wald S. 107.

Digitized by Google

Tafel III.

Figur 1. Grauer Sinaigranit aus dem Sand der Gaâwüste. Die im Sand versteckte untere Hälfte ist durch Verwitterung angegriffen, aber fest, die dem Beschauer zugekehrte obere Hälfte ist durch Insolation zerbröckelt S. 145.

Figur 2. Zerbröckelter rother Granit des Dj. Masraije S. 145.

Figur 3. Frische Bruchfläche des rothen Sinaigranit S. 145.

Figur 4. Kalk vom Uâdi Omm Ruthi, durch Desquamation oberflächlich in Schalen zerlegt S. 18.

Figur 5. Hohles Kalkgeröll aus dem Schotter des U. Ssannur S. 26.

Figur 6. Hohles Kalkgeröll aus der Kieswüste 10 Kilometer westlich von den Pyramiden S. 26.

Figur 7. Hohles Kalkstück, dessen obere Wand durch Verwitterung ganz abgetragen ist, so dass man in die ausgewitterte Höhlung hineinsieht, und den Gegensatz zwischen der Innen- und Aussenseite erkennen kann, aus dem Uâdi Guerraui S. 26.

Tafel IV.

Figur 1. Kalk von fast homogenem Querbruch, durch Sandgebläse corrodiert, zeigt auf der Oberfläche seine Zusammensetzung aus härteren und weicheren Schichten. Aus dem Uâdi Sidr S. 37 u. 94.

Figur 2. Nummulitenkalk der nördlichen Galâla, der längere Zeit dem (von rechts kommenden) Sandwind ausgesetzt war. Dadurch sind auf der rechten Seite die Nummuliten herausmodelliert, auf der linken Seite ist der Sand herabgelaufen und hat mäandrische Furchen eingeschliffen S. 94.

Figur 3. Dreikanter aus der Pyramidenwüste S. 102.

Figur 4. Älterer Korallenkalk des Râs Muhâmmed, durch Sandgebläse corrodiert S. 94.

Figur 5. Grosser Dreikanter aus der Pyramidenwüste S. 102.

Figur 6. Facettengeröll (Dreikanter) ohne Kanten aus der Pyramidenwüste S. 102.

Tafel V.

Figur 1. 3. 9. Dreikanter aus der Pyramidenwüste S. 102.

Figur 2. Rundgeschliffene Feuersteinkugel vom grossen versteinerten Wald S. 100.

Figur 4. 5. 6. 7. Manganconcretionen aus Nubischem Sandstein des Arabagebirges S. 98.

Figur 8. Jaspisgeschiebe der Kieswüste vom grossen versteinerten Wald mit Firnissglanz S. 100.

Figur 10. Kalk mit härteren Zwischenschichten, welche durch Deflation (ohne Sandschliff) herausmodelliert wurden, vom Uâdi Ashar S. 37.

Digitized by Google

Tafel VI.

Figur 1. Fragment eines weissen erdigen Kalkblockes aus den Steinbrüchen von Turra. Die Oberseite zeigt die Spuren altägyptischer Meiselhiebe, welche im Laufe von 4000 Jahren mit der braunen Schutzrinde überzogen wurden S. 111 u. 116.

Figur 2. Quarzgeröll, auf der Oberseite gebräunt, unten hellfarbig, vom Dj. Nakûs S. 114 u. 115.

Figur 3. Feuerstein aus der Kreide östlich vor den Mauern des Kloster S. Antonius. Der frische Querbruch ist hellgrau. Die Unterseite rothbraun gefärbt S. 115.

Figur 4. Nummulitenkalk aus dem Uâdi Dugla. Die Oberfläche des hellen Kalkes ist gelb gefärbt. Die Nummuliten sind, soweit sie der Sonne ausgesetzt waren, dunkelbraun gefärbt, und ragen über die Gesteinsfläche hervor. Der untere Nummulit ist losgelöst von seinem Stiel und umgekehrt darauf gelegt, um das helle Innere zu zeigen S. 115.

Figur 5. 6. Ebensolcher Nummulitenkalk von Uâdi Dugla S. 115.

Figur 7. Ebensolcher Nummulitenkalk des Uâdi Ashar, nahe dem auf Fig. 22 abgebildeten Hügel S. 115.

Figur 8. Bruchstück eines Blockes von der Spitze der Cheopspyramide, dessen Oberfläche gebräunt ist S. 111 u. 116.

Tafel VII.

Wüstensandproben, photographiert auf einer halb schwarzen, halb weissen Unterlage. Die vorherrschend gelbe Farbe des Sandes lässt die Proben auf der Photographie dunkler erscheinen, als sie wirklich sind. Die Tafel soll die sehr verschiedene Korngrösse und Gestalt der Sandkörner zur Darstellung bringen. Es wurden daher extreme Proben gewählt. Am häufigsten ist der Sand der Fig. 3 u. 6.

Figur 1. Sand der Kieswüste am grossen versteinerten Wald, untermischt mit gerundeten Fragmenten von Kalk- und Kieselgesteinen S. 148.

Figur 2. Zerbröckelter Granitsand vom Dj. Masraije, bestehend aus scharfkantigen Stückchen von Quarz, rothem Feldspath, Glimmer und Hornblende S. 20. 145. 148.

Figur 3. Gelber Quarzsand von einer Düne nordwestlich von Abû Roâsch S. 148.

Figur 4. Glimmerhaltiger Sand von der Fig. 79 abgebildeten Düne (bei *a*) vom Dj. Burbäh S. 148 u. 152.

Figur 5. Sehr grobkörniger Quarzsand westlich von den Pyramiden S. 148.

Figur 6. Feinkörniger Granitsand vom Krén Utud, 100 m über der Wüstenebene S. 148.

Figur 7. Weissgelber Oolithsand von einer Düne an der Mündung des Uâdi Dehēēse S. 184.

Figur 8. Cerithiumsand aus der Lehmwüste vom Râs Sibylle S. 187.

Digitized by Google

Tafel VIII.

Figur 1. Gesprungenes Geröll aus dem Sandsteinconglomerat, in welchem die Baumstämme des grossen versteinerten Waldes eingebettet sind S. 132.

Figur 2. Sandgerundetes Stück des Dj. Achmar-Sandsteins mit Firnissglanz S. 100 (aus Versehen ist die andere Seite des Stückes, welche Abdrücke von Conchylien zeigt, nicht zur Darstellung gekommen).

Figur 3. Conglomeratischer Sandstein des grossen versteinerten Waldes S. 128 u. 132.

Figur 4. Scharfkantiges Fragment von versteinertem Holz aus dem Sandstein des Dj. Achmar S. 133 u. 134.

Figur 5. 7. Rothe Sinterröhren (Querbruch), von der Nordseite des Dj. Achmar S. 133.

Figur 6. Abguss (der Rinde?) des verkieselten Holzes vom grossen versteinerten Wald S. 127.

Digitized by Google

Index.

Die fettgedruckten Zahlen geben Kapitelüberschriften an.

1. Sachregister.

Abblättern der Gesteine 18.
Abrasion (für Sandgebläse gebraucht) 92.
Abschuppung 21.
Äolische Sedimente 173.
Aetheria 194.
Alabastergänge 28.
Algenkalk 115.
Amphitheater 67. 69. 70.
Anastatica hierochondica 33.
Araucarioxylon 130.
Areg (Sandwüste) 51.
Artemisia judaica 32.
Artefacte von Feuerstein 36. 105. 201.
Asteriscus pygmaeus 33.
Auslese des Härteren 90.

Barchan (Düne) 162.
Basalt, erwärmt 147.
— vermeintlicher 110.
— zerspringt 105.
Bathah (Sand) 145. 146. 147.
Baumstämme in Dünen 131. 163.
Bergsturz 13.
Blöcke, hohle 26. 28. 29.
— isolierte 124.
Bogendünen 162.

Calligonum 34.
Cardium 194.
Cerithium 187. 188.
Chamsin (Wind) 151.
Charaschaf (Felswüste) 51.
Chirotheriumfährten 183.
Circusthal 58. 60. 67. 69. 81.
Concretionen. Feuerstein 99.
— Mangan 96. 98.
— vermeintliche 125.

Deflation. Begriff 38.
— Resultat 42. 62. 67. 73. 90. 98. 99. 124. 132. 155.
— Wirkungsweise 36. 37. 38. 39. 59. 72. 82. 99.
Denudation. Fläche 43. 46. 89. 210.
— Grundgesetz der 89.
— Producte 140. 205. 210.
— regionale 89.
Depressionen 193. 206.
Desquamation 18. 19. 20. 21.
Diagonalschichtung 175. 176. 177. 184. 211.
Discordante Parallelstructur 96. 175.
Dislocationen. Bedeutung für die Bildung der Sedimente 87.
— in Ägypten **52.** 73. 81. 195.
Djebel (Bergwüste) 51.
Djefdjef (Lehmwüste) 51.
Dreikanter 101. 102.
Dünen. Bildung **158.** 171.
— Böschungswinkel 157. 167. 173.
— durch Wasser verändert 12.
— feststehend 160. 161. 169. 170.
— Form 98. 142. **156.** 161.
— gekrümmt 162. 163.
— geradlinig 161.
— geschichtet 172. 173.

Dünen, rund 161.
— trockene Sandbänke 157.
— wandernd 160. **169.** 172. 177.
Dünensand, Bildung 155.
— kein Meeressand 137.
— rein 137. 138. 170.
— glimmerhaltig 144. 152.
— hornblendehaltig 170.
— thonhaltig 180.
— Transport 143.
Dünensandstein 177.

Echinolampaskalk 37.
Eis 14.
Electricität **41.** 209.
Erg (Sandwüste) 51.
Erodium 32.
Erosion 38. 42. 59. 60. 67. 69. 71. 72. 73. 74. 84. 85. 208.
— »verkehrte Form« 194.

Facettengerölle 102. 103. 104.
Fährten 182.
Feisch (Kies) 112.
Feldspath, isolierte Krystalle 145.
— verwittert 149.
— zerbröckelt 149. 150.
Felspfeiler 73. 121.
Felswüste 44. **52.**
Formen **57.** 118.
Firnissglanz der Steine 47. 100. 101. 107.
Fossilreichthum Ägyptens, scheinbar 95.
Fuldjes (Düne) 162. 163. 164.

Gehängeschutt an Granit 44. 57. 60. 206.
— an Kalkbergen 45. 81. 124.
— an Sandstein 45. 62.
— Bildung 13.
Gerölle, durch Wasser gerundet 100.
— durch Sand gerundet 100. 101.
— halbzersprungen 106.
— Oberseite gebräunt 113. 114.
— zersprungen 106. 107. 133.
Gesteine, einfarbige 18.
— krystallinische 142.
Gesteine, polychrome 21.
— verkieselte 82.
Gewitter 11. 13. 83. 84. 177.
Geysir 134. 135.
Ghard (Düne) 163.
Glimmer im Dünensand 144. 152.
— zerkleinert 149.
Granit, verwittert 146.
— löcherig 24.
— zerbröckelt 141. 142. **145.** 146. 152.
Gyps in der Wüste 50.

Hamada (Kieswüste) 47. 49. 50. 51. 63. 76. 90. 91. 104. 109. 163. 211.
Harra (Kies) 112.
Härteunterschiede der Gesteine 93.
Hochwasser 13. 69.
Hohlkehlen an Felsen 76.
Holz, versteinertes **125.** 129 136.
— vorcretaceisch 128. **129.** 131.
— nacheocän 125. **131.** 136.
Humus, fehlt 15. 30. 143. 195. 196.
— neu gebildet 202.

Igidi (Sandwüste) 51.
Inschriften 22.
Insolation 18. 21. 42. 59. 85. **104.** 125. 149. 206.

Kaar (Düne) 165.
Kamelschliff 101.
Kantengerölle 101.
Kelb (Düne) 162.
Kesselthal 67.
Kibsch (Düne) 162.
Kieswüste 45. **46.** **88.** 90. 91.
Klima, constant **193.** 199. 211.
— locale Veränderungen 202.
— der Wüste 10.
Korallendolomit 114.

Laterit 30.
Lehmwüste, Name 44. 89. **185.**
— Oberfläche 50. 186. 187.
— Salzgehalt 50. 188.

Digitized by Google

Lehmwüste, Entstehung 188. 211.
— Verbreitung 50. 178.
Lössstaub auf Dünen 174.
Luftfeuchtigkeit 14. 15. 25.

Mangankugeln, hohle 98.
Medusenabdrücke 183.
Meeressand, unrein 137. 138.
Meteorologie der Wüste 8. 42.
Moränen, vermeintliche 58. 86.

Nebel 14.
Nefud (Sandwüste) 51.
Neulinge 33. 34. 35. 199. 208.
Nicolia 125. 126. 127.
Niederschläge, regelmässige 10.
Nilerde, humusarm 30.
Nilkiesel 99.
Nilschlamm 8. 196.
Nilthal 14.
Nummuliten, gebräunt 114. 115.
— herausgeblasen 94. 115.
Nyctomycetes 126.

Oasenbildung 62. 206.
Ölflecke 192.
Oolithgestein, äolisch 183.
Ozon 41. 209.

Pflanzendecke 15. 42. 86.
Pflanzenwuchs 30. 32. 90.
Pilzfelsen 25. 117. 123. 124. 206. 208.
Pluvialperiode, vermeintliche 87.
Polarregion 15.
Politur der Wüstenkiesel 100.
Porphyrblöcke, zersprungen 107.
— angeblasen 93.
Porphyrgänge, herausmodelliert 95.
Pseudodiademakalk 37.
Pyramidenbau 77. 196.

Raml (Sand) 145. 146.
Ramle (Sandwüste) 51. 162.
Regen, durch Vegetation wirkungslos 12.
— in der Wüste 14. 83.
— periodische 13. 84.
— plötzlicher 11. 19.
Regen, tropischer 10.
Regenniederschläge 10. 119.
Regentropfen 180.
Regenwolken 11.
Rinde, schwarze 110.
— von Russ 110.
Rippelmarken 49. 144. 159. 167. 178. 179.
Rodm (Felswüste) 51.
Rundhöcker 24. 83. 144. 210.

Saharameer 139. 141. 185. 193. 194.
Salz, Staub 191.
— blätterig 190.
— stengelig 190.
— wandert 190.
— Vertheilung 185.
— Einfluss auf Denudation 78.
Salzgehalt der Wüstenluft 191.
Salzkruste 50.
Salzthon 178. 187. 188.
Samum 11. 40. 157.
Sandgebläse 24. 26. 39. 42. 91. 119. 208.
Sandhosen 149. 154.
Sandmeer 44. 48. 157. 158.
Sandschliff 37. 39. 100.
Sandstein, verwittert 139. 140. 142.
Sandwind 40. 150. 161.
Sandwüste, Name 44. 48. 89. 137.
— Form 49. 211.
Säulengänge 25. 117. 177. 208.
Savanne 10. 152.
Schlacken in holzarmer Gegend 199.
Schliff, pseudoglacial 101.
Schnee 14. 44.
Schneewehen, constant 171.
Schott (Lehmwüste) 50. 51.
Schotter 58.
Schutthalde 13. 44. 45. 59. 60.
Schuttland 32.
Schutzrinde, braune 21. 23. 25. 42. 82. 109. 112. 142. 208.
— Analyse 113.
— Bildung 109 116. 117. 119. 124.
— Zerstörung 122. 124.

Digitized by Google

Sebcha (Lehmwüste) 50. 51. 78. 186. 187.
Sedimente, festländische 205.
Sedimentgesteine 3. 57.
— äolische, mit marinen Resten 173.
Sinterröhren 132. 133.
Sperrmauer 28.
Sphinx 96. 97.
Sprünge im Gestein 19. 20. 21. 104. 106. 146.
Spuren im Sand **178.**
Sserīr (Kieswüste) 49. 51. 91. 99. 104. 109. 211.
Ssif (Düne) 162.
Staubfälle 153.
Staubwind 150. 151. 153.
Steppenbildung 152.
Sterculiaceen 128.
Strichregen 11. 14. 83.
Sturzbach 12.
subaërisch 36.
Süsswasserkalk 200.

Tafelgebirge 62. 64. 71. 76.
Tamariske 34.
Tasili (Felswüste) 51.
Thalkessel 58.
Thalsystem 59. 60. 68. 69. 208.
Thau 11. 14. 15. 16. 46. 163.
Témoin (Zeuge) 63.
Temperatur **15.**
— des Sandes 17.
— dunkler Gesteine 18.
— heller Gesteine 18.
— Maximum 17.
— Minimum 16.
— Schwankungen 15. 19. 146. 154.
Thonschlamm 174. 181.
Tropengürtel 15.

Uädi, Bildung 11. 38. 40. 73. 74. 208.
— Form 45. 70. 72. 74.
— Schotter 14. **83.** 117. 194. 210.
— Verlagerung 60. 88.

Verkieselung, vermeintliche 90.
Versteinerung härter als das Gestein 94. 129.
Versteinerungsprocess 134. 135.
Verwitterung 19. **22.** 23. 29. 59. 85. 90. 206.
— im Schatten 20. 23. 24. 25. 80. 119. 120.
— bei Nacht 149. 207.
— »von innen heraus« 26.
— cumulative 30. 32.
Vulcan, vermeintlicher 132. 133.

Wald, versteinerter 95. 132. 148.
Wasserscheide 68.
Wasserschliff 100.
Wind **35.** 39. 40. 159. 163.
— Wirkung 26.
Wirbelwind 39.
Wüste, Begriff 10.
— Charaktere **43.**
— Eintheilung 43. 44.
— fossile 5. 204.
— gesetzmässig 204.
— zonar geordnet 203.
Wüstenbäche, versiegende 84.
Wüstenkiesel 99.
Wüstenluft, durchsichtig 53. 150.
Wüstensand, Bestandtheile 49. 143. 148.
— Farbe 139. 143. 144. 163. 176.
— Korngrösse 140. 145. 148. 164.
— Bildung durch Abrasion 137. 155. 170.
— Bildung durch Erosion 141. 155.
— Bildung durch Verwitterung 140. 155. 169.
— Bildung durch Zerbröckelung 21. 141. 147. 155.
— sonderbare Analyse 148.
— Transport 49. 140. 164.
Wüstensandstein 141.
Wüstensalz **185.** 189.

Zerbröckeln der Gesteine 20. 21. 82.
— salzhaltiger Gesteine 78. 85.
Zeugenberge 34. 48. 63. 71. 80. 195. 206.
Zeugenberge, Verbreitung 66. 69.
— Dimensionen 65.
— schiefe Form 80.
— Bildung 63. 66. 81.

2. Autorenregister.

Agassiz, L. 184.
Arago 196.
Ascherson 34. 38. 198.

Barth 48. 142.
v. Bary 34. 62. 64. 104. 112. 124. 139. 140. 172. 182. 187.
Behm 105.
Berendt, G. 101. 171.
Bernard 8. 64.
Blunt, Lady 51. 145. 163. 164. 165.
Braun 135.
Brun 147.
Buderba 112. 139. 160.
Buvay 153.
Buvry 63. 185.

Cosson 188.
Credner, H. 102.
Czerny 40.

Darwin, H. 179.
Delesse 180.
Denham 112.
Desor 193.
Dinklage 153.
Doughty 61.
Dove 15. 195.
Dubocq 189.
Duveyrier 10. 12. 17. 41. 43. 48. 49. 51. 53. 61. 106. 124. 161. 199.

Ebers 57. 67. 150.
Ehrenberg 142. 158. 170.
Escher v. d. L. 193.
Euting 10. 43. 51. 145. 165.
Exner, F. 25.

Forchhammer 171. 173.
Forel 180.
Fraas, O. 26. 30. 54. 58. 61. 73. 96. 106. 194. 195. 196.
Frauenfeld 35.

Geuther 191.
Glaser 112.
Gürich 156.
Güssfeld 57. 105.

Haeckel 136.
v. Hauer 170.
Heim 102.
Hellmann 153.
Hornemann 112.
Hull 87.
Humboldt, A. v. 110.
Hunt 179.
v. Huyssen 189.

Jordan 11. 17. 40. 146. 156. 157. 158. 159. 160. 161. 173.

Kaiser 9.
Klunzinger 33. 143. 198.
Krukenberg 131.
Kuntze 134.

de Lauture 15. 16. 170.
Lenz 48. 141. 148. 160. 170. 173.
Livingstone 105.
Lyell 180.
Lyon 112.

Mayer-Eymar 194.
v. Meckel 117.
Meyen 167.
Michel 99.
Mickwitz 102.

v. Middendorf 43. 162. 166. 167. 169. 174.

Nachtigal 11. 15. 41. 47. 48. 51. 162.
Neumayr 96. 194.
Nicol 126.

Oldenburg, Erbgrossherzog von 99.
Oudney 112.
Overweg 111. 139.

Pechuel-Lösche 110.
Peschel 10.
Philippi 106.
Pouillon-Boblaye 136.
Przewalski 35.

Remelé 8.
v. Richthofen 4. 11. 12. 19. 32. 43. 72. 153. 162. 204.
Robecchi 122. 123. 125.
Rohlfs 10. 16. 17. 34. 39. 47. 48. 50. 51. 63. 98. 112. 159. 161. 188. 191. 199. 202.
Rolland 157. 169.
Roudaire 50. 186. 193.
Rüppell 151.
Russegger 10. 54. 110. 111. 125. 129. 133. 170.
Rütimeyer, L. 58.

Sarasin 102.
Sauer 102.
Schenk 125. 129. 130. 143.
Schneider 151.
Scheuermann 151.
Schumann 130.
Schweinfurth 7. 9. 14. 28. 29. 30. 37. 45. 51. 53. 64. 68. 69. 70. 71. 72. 91. 99. 100. 104. 105. 106. 117. 120. 124. 125. 128. 131. 133. 136. 141. 142. 192. 196. 199. 200. 201.
Sedillot 136.
Serres, de 137.
Sickenberger 117.
Stapff 83. 109. 143. 144. 157. 171. 172.
Suess 54. 202.

Thoulet 92. 153.
Tietze 105.
Trémeau 125.

Unger 125. 128. 130. 198.

Vatonne 106. 168.
Vere Monro 126.
Vogel 112. 130. 159. 187.
Voigt 183.
Volkens 14. 15. 32.

Wagner 52.
Wheeler 17. 112.
Whitaker 36.
Wingard 113.
Wissmann 110.
Worthington 180.
v. Wrede 67. 131. 148.

v. Zittel 8. 41. 48. 113. 129. 133. 140. 157. 159. 160. 173. 194. 200. 201.

Digitized by Google

3. Ortsregister.

D. = Djebel, Berg, Gebirge.
O. = Oase.
R. = Ras, Küstenvorsprung.
S. = Schott, Salzwüste.
U. = Uâdi, Thal.
W. = Wüste.

Aalem 166.
Abessinien 128.
Abu Rimth U. 7.
Abu Roasch 37. 52. 56. 77. 81. 82. 102. 148. 190. 201.
Abu Senime, R. 6.
Abu Terefie 70.
Achmar D. 47. 128. 129. 131. 132. 133. 134.
Ade 203.
Agidir 202.
Agra 24.
Ahaggar 10. 12. 49.
Ahfrak D. 133.
Ahkaf W. 67.
Aijmir 24.
Aja D. 51.
Ajuhss D. 79.
Ammon O. 188. 189.
Angra Pequena 143.
Anton, St., Kloster 7. 55. 115. 189. 190.
Araba D. 6. 98. 121. 124. 144. 148. 152. 159.
Arabah U. 7. 39. 55. 56. 102. 130. 181. 185.
Arabien 44. 112. 145. 162.
Areg el Nfech 148.
Ashar U. südlich 7. 25. 53. 55. 104. 109. 115. 118. 119. 121. 196.
Assuan 110. 142.
Atakah D. 46.
Atacama 106. 203.
Atlas 44. 60.
Audjilah 39.
Aus 143.
Axenstrasse 118.
Ayin Marcha 116. 150.
Azelkha-n-Bodelkha 12.
Azgar D. 112.
Bahiuda 10.
Bahr-bela-ma 160. 198.
Barak U. 150.
Bay Hardjah 148.
Beckere D. 48.
Bela-ma U. 68. 69.
Ben Auegir U. 34.
Beni Suef 7.
Berenice 142.
Bilma 50. 190. 191.
Bir Beránin 34.
Bir Terfaya 64.
Biskra 63.
— U. 189.
Boiling-lake-geysir 134. 135.
Borku 163.
Brasilien 105.
Budra U. 6. 57.
Bumina 110.
Burbäh D. 26. 93. 152.
Burdess W. 150.
Cairo 6. 15. 25. 55. 68. 95. 115. 126. 127. 128. 132. 192.
Californien 112.
Ceylon 110.
Chadames 168.
Chargeh O. 64. 200. 201.
Chaschab D. 125.
Cheopspyramide 111.
Cherery 125.
Chile 162.
Choms 202.
Churmat el Tuzzizet 47.
Constantine 135. 136.
Cyrenaica 29. 199.
Dachel O. 10. 129. 140. 198.
Deheese U. 183. 184.
Der el Bahari 200.

Djehän R. 93.
Djerid Sch. 194.
Djimseh R. 201.
Dreisamthal 74.
Dugla U. 18. 55. 68. 69. 77. 114. 115. 125. 207.

Ephedraschlucht 68.
Erruin D. 64.

Fayum O. 194.
Feiran U. 6. 30. 31. 32. 74. 84. 86. 87. 88. 108.
Feraje D. 143.
Ferghana 166.
Fesan 34. 159. 199.
Feschen 38.
Firehole river 135.

Gaà W. 6. 34. 107.
Gaà el D. 84. 103. 190.
Galàla D. südlich 7. 18. 33. 44. 54. 55. 101. 115. 118. 121. 181.
— nördlich 130.
Gärten des Durstes 39.
Ghara O. 122. 123. 125.
Gharandel U. 67.
Gharib D. 45. 57. 60. 70.
Ghasala U. 70.
Ghat 112. 160. 187.
Giseh 27. 28. 53. 55. 102. 111. 114. 194. 197.
Gobi 203.
Golea el D. 159. 190.
Granges. Thal 154.
Grûm 37. 191.
Guelb-el Zerzour 65.
Guerraui U. 28. 29. 55. 80. 199.

Habib U. 72.
Had D. 112.
Hadj Hadjil 159.
Hadhramaut W. 66. 131. 148.
Hail 166.
Hammam Berda 136.
— Meskutin 135. 136.
Hammam Musa D. 140.
Harudsch el Aswad 112.
Hascheb U. 57. 119. 120. 121. 176. 178.
Hattiga Tungur 163.
Hauaschieh U. 70.
Hebran U. 6. 74. 84. 87.
Heluan 15. 28. 36.
Hessi el U. 111.
Hoff U. 55. 68. 192.
Homra el Hamada 62. 187.

Jakutsk 15.
Idinen D. 61.
Idjeludja U. 12.
Igargarmellem U. 140.
Igidi W. 148. 160. 161.
Jin O. 163.
Ikohauen D. 62.
Inegeddi D. 140.
Innerarabien 10.
In Salah 10.
Jura 185.
Jütland 173.

Kalala 191.
Kalahari 203.
Kara 163.
Kauar 98. 191. 199.
Kef-el-Gara D. 80.
Key 184. 185.
Kokan W. 174.
Kokumen 187.
Kosser 104. 198.
Krên Utûd 25. 148.
Kufa 202.
Kuilu 110.
Kunzen 171.
Kutiat Gaturfa 186.

La Chaux de Fonds 185.
Langkofel 60.
Lyciumschlucht 68. 114.

Digitized by Google

Madison river 135.
Mafun 130.
Magdala 128.
Maghara U. 96. 199.
Marchâ D. 56.
Masraije el D. 20. 25. 148.
Mattai 120. 124.
Mayfab U. 131.
Mbel U. 83. 84.
Meharret el D. 87.
Mellaha U. 194.
Melrir Sch. 185. 193.
Meschru U. 199.
Mazazem 50.
Minhero U. 182.
Mokkatam 25. 47. 55. 69. 81. 114. 125. 189.
Mokatteb U. 6. 22. 96.
Mucheired U. 59. 60. 88.
Muhammed R. 6. 10. 57. 144. 176. 178.
Murzuk 15. 41. 130. 187.

Nakus D. 22. 23. 114. 118. 119. 120. 121.
Namieb W. 144.
Nana 25.
Nasb U. 54.
Nasesad R. 150.
Nationalpark 134.
Natronseen 159.
Nefud 51. 145. 163. 164. 165. 166.
Nehrung, Kurische 130. 137. 171.
Nesaret D. 64.
Niblum 171.
Nubien 111. 142.

Oase, grosse 128.
Omm Churm U. 71.
Omm el Renneiem 64.
Omm Ruthi U. 7. 18. 118. 121.
Omm Schomer D. 60.
Ostpreussen 170.
Oursel 12.

Pallisaden 110.
Pampa grande 162. 167.
Patar 166.
Persien 105.
Plicatulathal 81.

Quanza 110.
Quige 110.

Radiolitenkessel 77.
Ralle U. 63.
Ramle 151.
Rantum 171.
Rarbi U. 139.
Regenfeld 11. 17. 129. 201.
Rharsa Sch. 194.
Rische U. 61.
Rhoda 30.
Rischrasch U. 45. 71.
Rosengarten 60.

Sâchara U. 57.
Saron 30.
Schag 99.
Scheb el U. 7. 48.
Schech Reijah 25. 34.
Schechs el U. 61.
Scheikie 111.
Schellal U. 54.
Schiati U. 111. 139.
Schubra 30.
Serbal D. 60.
Set D. 99.
Setif 136.
Sidr U. 58.
Sih el Touil 168.
Sinaihalbinsel 11. 12. 23. 44. 102. 114. 145.
Sinaoun 63.
Siut U. 73.
Siwah O. 194.
Sleij U. 24.
Sokna O. 51. 112.
Soturba D. 91.
Ssannur U. 7. 18. 105. 201.
Suakin 104.
Sudah D. 112.
Südamerika 110.

Digitized by Google

Sues 6. 151. 184.
Suffr D. 56. 81. 199.
Sylt 171.

Takarahet 124.
Tamentil 50.
Tarfeh U. 120. 124.
Tarhit U. 12.
Tarurit D. 139.
Tasili 12. 53. 124.
Tayibe U. 67. 84. 188.
Tête-de-Rang 185.
Tibbu 112.
Tibet 35.
Tih U. el 195.
Timan U. 61. 84.
Timozzudjen 53.
Tintümma 202. 203.
Titershin U. 12.
Tobruc 29.
Tor 6. 9. 22. 34. 191.
Tozeur 186.
Tripolis 34. 104. 112. 139.
Tsad-See 162. 190. 202.
Tümmo D. 62. 112.
Turkestan 162. 166.
Turra D. 69. 70. 111.
Turra U. 192.

Uegi el U. 45.

Vogesen 153.

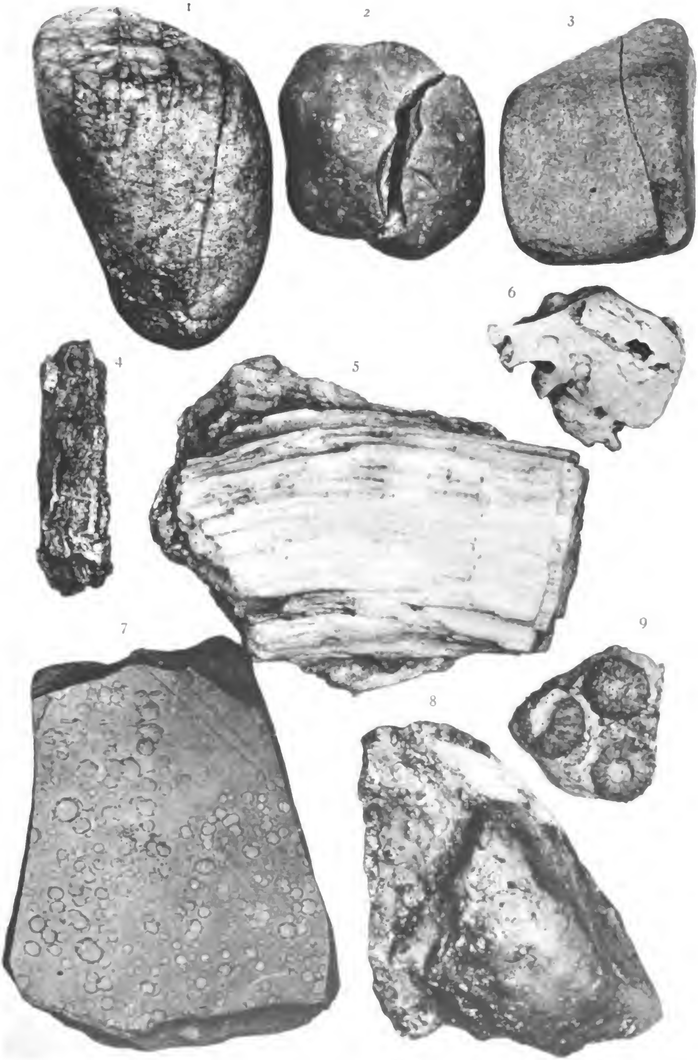
Walfischbay 109. 144.
Wald, versteinerter 47. 79. 125. 126. 127.

Digitized by Google

Inhalt.

		Seite
I.	Meteorologie der Wüste	352
	1. Regenniederschläge	354
	2. Temperatur	359
	3. Verwitterung	366
	4. Pflanzenwuchs	374
	5. Wind	379
	6. Electricität und Ozon	385
II.	Charaktere der Wüste	387
III.	Die Felswüste	396
	1. Dislocationen in Ägypten	396
	2. Die Formen der Felswüste	401
	3. Die Uâdischotter	427
IV.	Die Kieswüste	432
	1. Das Sandgebläse	445
	2. Insolation	448
	3. Die braune Schutzrinde	453
	4. Die Säulengänge und Pilzfelsen	461
	5. Das versteinerte Holz	469
V.	Die Sandwüste	481
	1. Bildung des Wüstensandes	481
	2. Form der Dünen	500
	3. Wandern der Dünen	513
	4. Spuren im Sand	522
	5. Äolische Oolithgesteine	527
VI.	Die Lehmwüste und das Wüstensalz	529
VII.	Die Beständigkeit des Klimas in Ägypten	537
VIII.	Rückblick	547
Erklärung der Lichtdrucktafeln		556
Index		560

Digitized by Google



Verschiedene Wüsten-Erscheinungen.

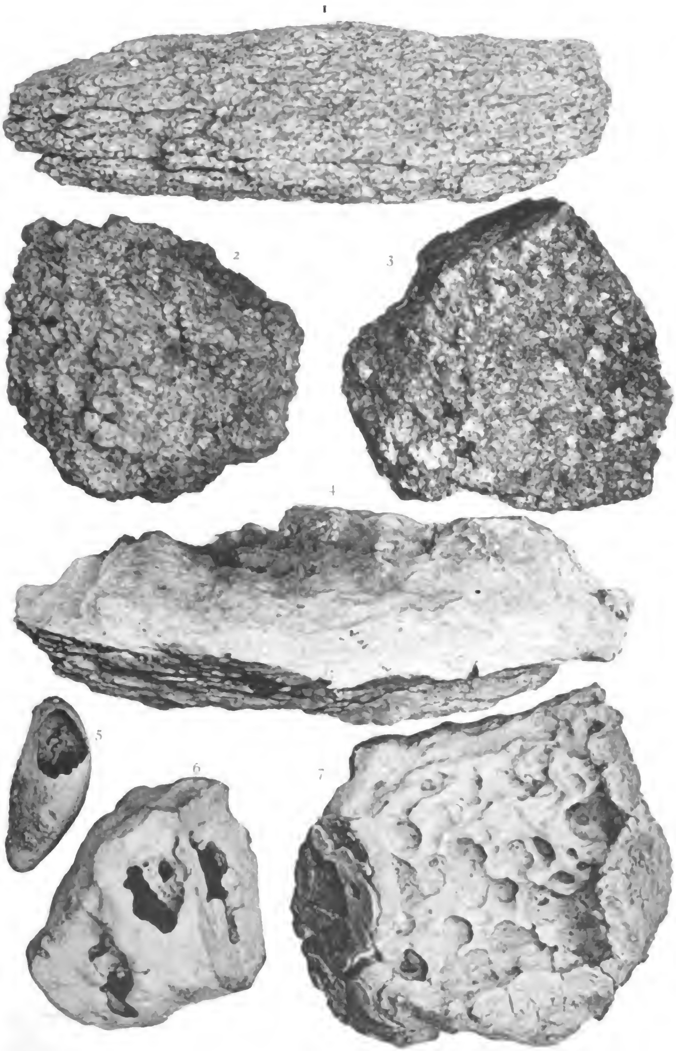
Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Insolation.

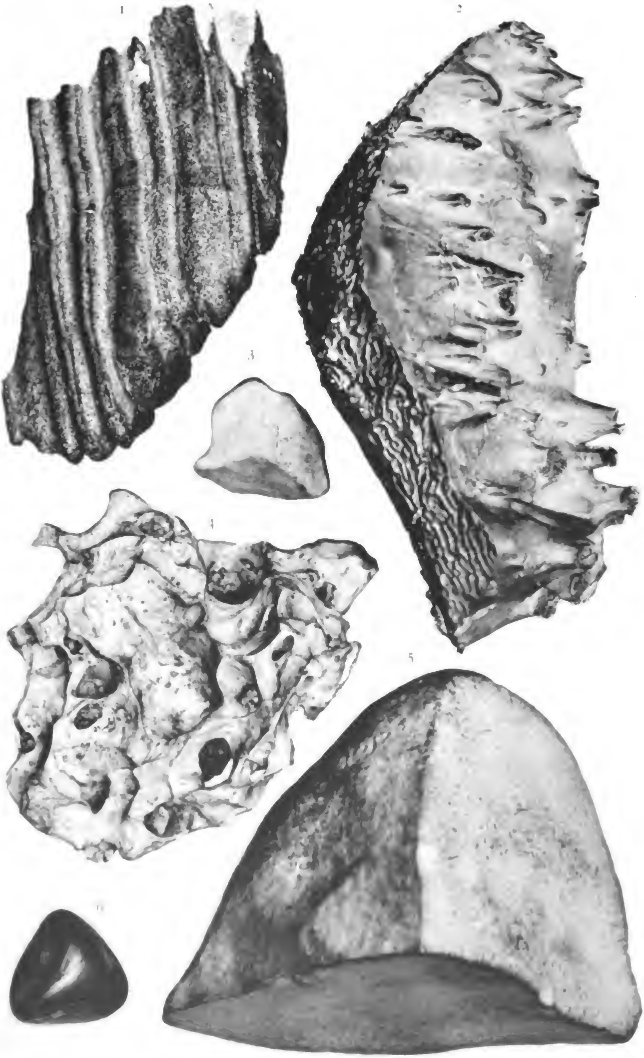
Digitized by Google



Zerbröckelung und Verwitterung.

Digitized by Google

Tafel IV.

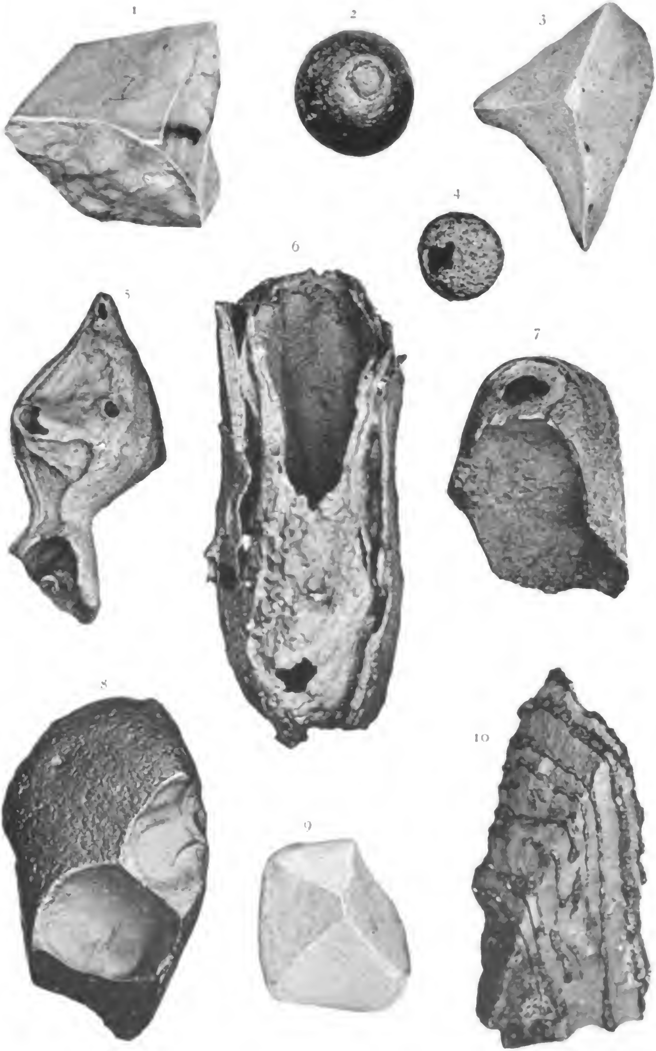


Digitized by Google

Sandschliffe

Digitized by Google

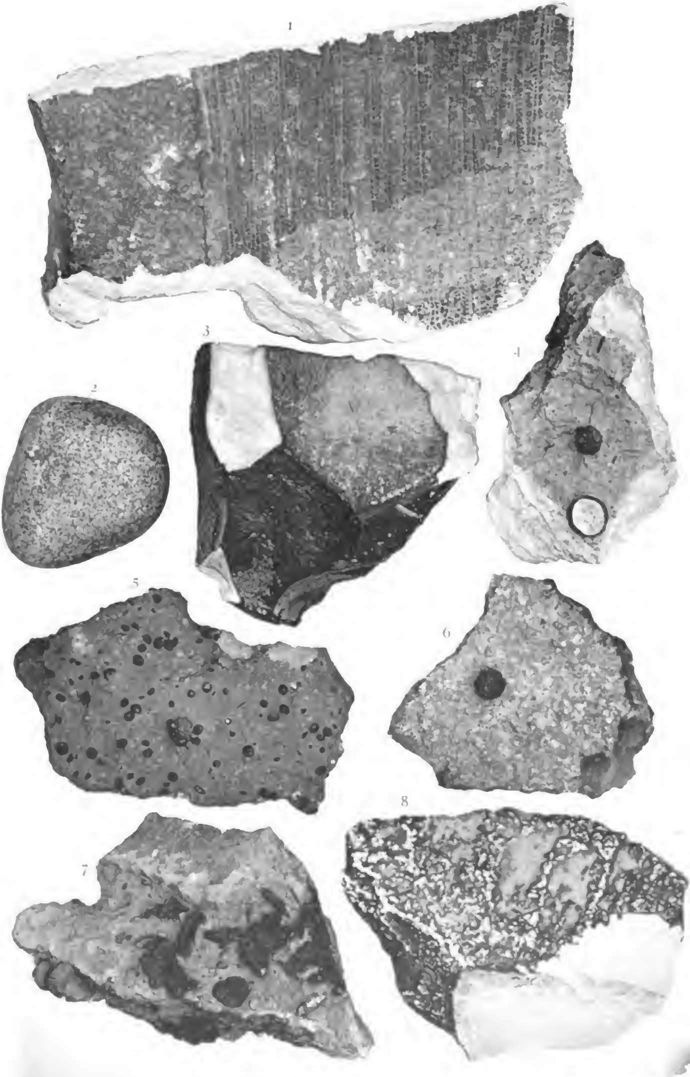
Tafel V.



Sandschliff und Deflation.

Digitized by Google

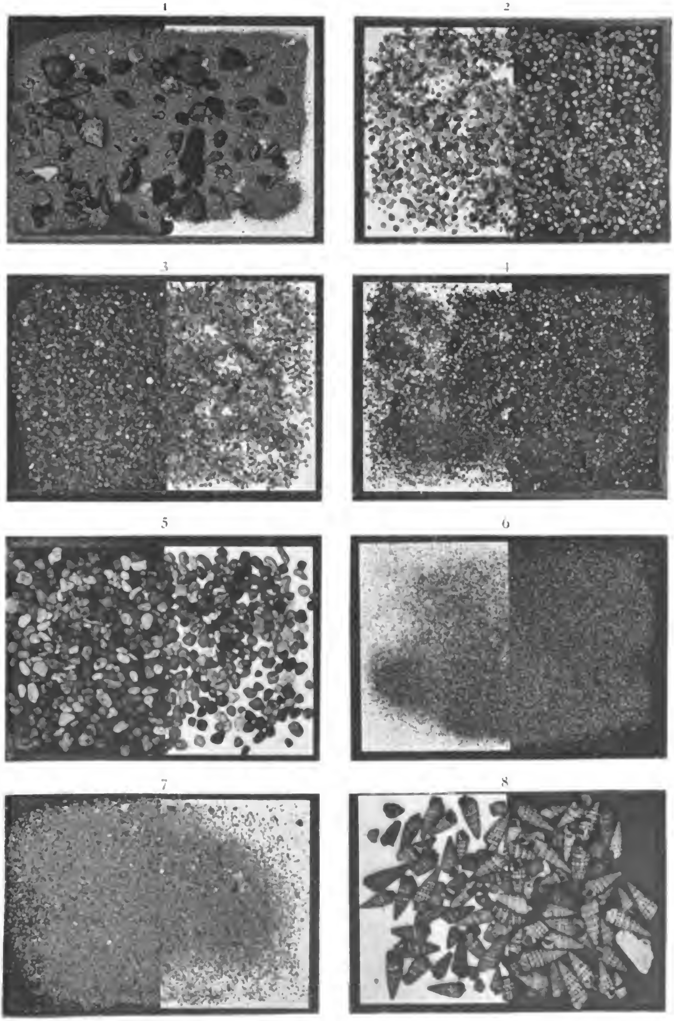
Digitized by Google



Die braune Schutzrinde

Digitized by Google

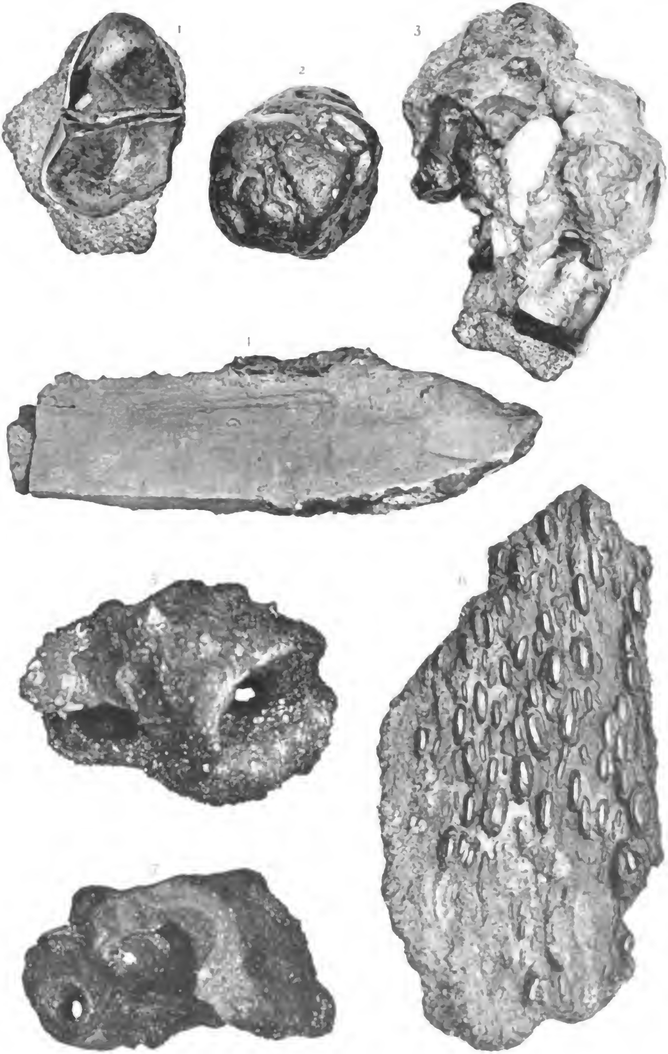
Digitized by Google



Wüstensand-Proben.

Digitized by Google

Digitized by Google



Djebel Achmar und Versteinerter Wald.

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

UNIVERSITY OF MICHIGAN
3 9015 07389 2744

Digitized by Google

Digitized by Google